

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA DE
COMUNICACIONES



Trabajo Fin de Grado

Sistema registrador de datos para estudios geofísicos

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: José Javier Fernández-Pacheco Cuesta

Tutor/es: Ernesto Martín Gorostiza

2020



UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE
COMUNICACIONES**

Trabajo Fin de Grado

Sistema registrador de datos para estudios geofísicos

Autor: José Javier Fernández-Pacheco Cuesta

Tutor: Ernesto Martín Gorostiza

TRIBUNAL:

Presidente: Francisco Javier Meca Meca

Vocal 1º: Jose Antonio Jiménez Calvo

Vocal 2º: Ernesto Martín Gorostiza

FECHA: 6 de Octubre de 2020





1 ÍNDICE

1	Índice	4
2	Índice de ilustraciones.....	6
3	Resumen	8
4	Abstract	8
5	Resumen extendido	9
6	Palabras clave	11
7	Fundamentos teóricos	12
7.1	Introducción.....	12
7.2	Descripción y clasificación del suelo	13
7.3	Propiedades físicas del suelo.....	15
7.3.1	Cohesión	15
7.3.2	Porosidad, índice de vacío y saturación	15
7.3.3	Densidad y peso unitario	16
7.3.4	Consistencia (Límites de Attenberg)	17
7.3.5	Gravedad específica.....	18
7.3.6	Consolidación	19
7.4	Ensayos de deformabilidad y resistencia de los suelos	22
7.4.1	Introducción	22
7.4.2	Modelo de Mohr-Coulomb	22
7.4.3	Descripción de los ensayos	25
7.5	Sensores y transductores utilizados en los ensayos	35
7.5.1	Desplazamiento	35
7.5.2	Fuerza.....	38
7.5.3	Presión.....	41
8	Sistema registrador desarrollado.....	46
8.1	Microcontrolador: Arduino Mega 2560 Rev3	47
8.1.1	Pantalla TFT 3.5"	48
8.2	Circuitos de acondicionamiento y calibración de las señales analógicas ...	50
8.2.1	Transmisión en bucle de tensión	50
8.2.2	Transmisión en bucle de corriente.....	51
8.2.3	Sensor de desplazamiento.....	51
8.2.4	Célula de carga.....	54
8.2.5	Sensor de presión	59
8.3	Sensores digitales.....	66



8.3.1	DHT22	66
8.3.2	DS3231	67
8.4	Fuente de alimentación.....	68
8.5	Pruebas y resultados	71
8.5.1	Metodología seguida.....	71
8.5.2	Presentación de resultados	72
9	Manual de usuario	74
9.1	Ajuste de la batería	74
9.2	Ajuste inicial del sensor de desplazamiento.....	75
9.3	Ajuste inicial del sensor de presión	76
9.4	Funcionamiento.....	77
10	Conclusiones	80
11	Bibliografía	81
12	Código de programación Arduino	82
13	Esquemáticos de los circuitos realizados de acondicionamiento	89
13.1	Sensor de presión	89
13.2	Célula de carga.....	91
14	Hojas técnicas	92



2 ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Desastres de ingeniería civil.	9
Figura 2. Sensor de presión, Célula de carga, Sensor inductivo de desplazamiento	10
Figura 3. Diagrama de bloques del sistema	11
Figura 4. Fases que conforman un suelo	15
Figura 5. Cuchara de Casagrande	17
Figura 6. Límites de Attenberg.....	18
Figura 7. Proceso de consolidación	20
Figura 8. Curva edométrica	21
Figura 9. Tensiones en plano de deslizamiento.....	23
Figura 10. Diagrama de Mohr	24
Figura 11. Diagrama de Mohr, condición de rotura	24
Figura 12. Coordenada más alta círculo de Mohr	25
Figura 13. Disposición de la muestra, fuerzas y desplazamientos.	26
Figura 14. Célula triaxial.....	27
Figura 15. Ensayo de compresión simple.	28
Figura 16. Esquema de un ensayo de corte in situ.....	30
Figura 17. Tallado de una muestra, Muestra preparada para ensayo.	30
Figura 18. Curva tensión de corte – desplazamiento horizontal	31
Figura 19. Sonda volumétrica Ménard, Sonda presiométrica.....	32
Figura 20. Curva presiométrica bruta.....	33
Figura 21. Ensayo de placa de carga con gato hidráulico	34
Figura 22. Sensor LVDT SM26.....	35
Figura 23. Disposición bobinas LVDT.	36
Figura 24. Diagrama de bloques módulo amplificador.....	37
Figura 25. Ajuste de ganancias LVDT.....	37
Figura 26. Célula de carga	38
Figura 27. Puente de Wheatstone.....	40
Figura 28. Fuelles	42
Figura 29. Tubos de Bourdon.....	42
Figura 30. Transductores de presión con galgas extensiométricas.....	43
Figura 31. Transductor de presión potenciométrico.....	44
Figura 32. Transductor de presión inductivo	44
Figura 33. Transductor de presión capacitivo	45
Figura 34. Arduino Mega 2560 Rev3.	47
Figura 35. Diagrama de tiempo del ADC.	48
Figura 36. Pantalla TFT.	49
Figura 37. Sistema de telemedida por tensión	50
Figura 38. Sistema de telemedida por corriente	51
Figura 39. Circuito acondicionador SM127	53
Figura 40. Módulo FZ0430.....	53
Figura 41. Dispositivo INA114BP.....	56
Figura 42. Etapa de entrada INA114	56
Figura 43. Etapa de salida INA114	57
Figura 44. Sensor de presión e13-vf.....	59



Figura 45. RCV420	60
Figura 46. Conexionado básico RCV420	61
Figura 47. RCV420 con alimentación única	61
Figura 48. NES555 configurado como oscilador aestable.....	62
Figura 49. Tensión de salida del oscilador aestable	63
Figura 50. Circuito generador de tensión negativa	63
Figura 51. Señal de salida del circuito.....	64
Figura 52. Circuito de ajuste del offset del RCV420	64
Figura 53. DHT22, DS3231	66
Figura 54. Circuito DS3231	67
Figura 55. Batería LVIF5-12	68
Figura 56. Esquema convertidor Boost.....	69
Figura 57. Módulo Boost XL6009	69
Figura 58. Esquema convertidor Buck	70
Figura 59. Convertidor Buck LM2596.....	70
Figura 60. LVDT y calibre utilizado para medición	71
Figura 61. Manorreductor y botella de nitrógeno, conexión en T de sensores de presión	72
Figura 62. Comparación de las medidas realizadas con el sensor LVDT	72
Figura 63. Comparación de las medidas realizadas por el sensor de presión.....	73
Figura 64. Comparación en la medición de temperatura	73
Figura 65. Disposición de la batería	74
Figura 66. Conexiones y potenciómetros del circuito SM127.....	75
Figura 67. Circuito acondicionador del transductor de presión	76
Figura 68. Potenciómetro de ajuste del offset del circuito acondicionador de presión	76
Figura 69. Terminales de conexión de los sensores	77
Figura 70. Pantalla de inicio datalogger.....	77
Figura 71. Resultados en LiveSerial.....	79
Figura 72. Disposición de los componentes en PCB y ruteado de pistas	89
Figura 73. Esquemático circuito completo de acondicionamiento de RCV420	90
Figura 74. Esquemático del circuito acondicionador de carga	91



3 RESUMEN

En este proyecto se muestra un sistema registrador de datos para estudios geofísicos. Para ello se propone el desarrollo de una herramienta portátil capaz de realizar ensayos in situ para ingeniería civil. Primero se incluye un estudio del modo de funcionamiento de los sensores, además de sus principios físicos asociados, para la medida de la carga, presión y desplazamiento que es capaz de soportar el terreno. Posteriormente se muestra el desarrollo del sistema de adquisición de datos, incluyendo el diseño de los diferentes circuitos de acondicionamientos de las señales obtenidas por los sensores y la programación de un microcontrolador Arduino para el control de la adquisición de dichas señales.

4 ABSTRACT

This project shows a datalogger system for geophysical studies. For this purpose, a portable tool capable of on-site testing for civil engineering applications is proposed. A study of the operating mode of the sensors and their associated physical principles, for the measurement of load, pressure and displacement that the ground can support, is carried out. Also, the developed data acquisition system is detailed, including the design of the sensor digital conditioning circuits and the programming of an Arduino microcontroller for acquisition control.

5 RESUMEN EXTENDIDO

Hoy en día la instrumentación electrónica está presente en diferentes aplicaciones para la ingeniería civil. Ya sea para la construcción de un edificio, una presa, un ferrocarril o una perforación petrolífera.

La instrumentación permite la interpretación de cómo interactuar con el entorno que nos rodea. Concretamente en el ámbito de la ingeniería geológica, gracias al uso de diferentes sensores, se consigue analizar el terreno donde se ha decidido realizar una construcción para intentar garantizar la seguridad de la construcción y evitar catástrofes de diferente índole.



Figura 1. Desastres de ingeniería civil. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha:

- (1) Presa de St. Francis (1928), imagen procedente de <https://momentosdelpasado.blogspot.com/2017/02/el-desastre-de-la-presa-st-francis.html>
- (2) Desprendimiento de tierra, imagen procedente de <http://esssa.com/2017/10/24/la-ingenieria-civil-en-la-prevencion-de-desastres/>
- (3) Torre de Pisa (Italia), imagen procedente de https://es.wikipedia.org/wiki/Torre_de_Pisa

Este proyecto se centra en la obtención de tres de los parámetros necesarios para conocer el terreno como son la carga y la presión que puede soportar, así como el desplazamiento que puede llegar a producirse en él. Se profundizará durante el fundamento teórico de la importancia de estas magnitudes, así como de los distintos ensayos que se realizan una vez tomadas las medidas.

Para la adquisición de estas magnitudes se hace uso de tres sensores: el sensor inductivo de desplazamiento, el sensor de presión y la célula de carga. En el apartado teórico se muestra el funcionamiento físico de dichos sensores, así como los transductores que permiten convertir dicha medida en una señal eléctrica.



Figura 2. (1) Sensor de presión, (2) Célula de carga, (3) Sensor inductivo de desplazamiento

A lo largo del apartado 8 se procede a desarrollar el sistema de adquisición que integra el *datalogger*, en el que se incluye los circuitos de acondicionamiento necesarios para adaptar las señales eléctricas recibidas de los transductores para ser interpretadas por un microcontrolador, de forma de poder mostrar en pantalla las distintas medidas tomadas por los sensores. La señal recibida del sensor inductivo es amplificada y adaptada para trabajar en un bucle de tensión, mientras que la señal de corriente recibida del sensor de presión de 4 a 20mA es convertida a tensión para poder ser leída. Respecto a la señal de la célula de carga requiere ser amplificada dado el rango de señal que transmite (del orden de unos pocos mV). Además se proporciona al operador la posibilidad de captura de los datos obtenidos, para una posterior interpretación de estos, mediante la conexión del equipo al puerto USB de un ordenador, o incluso mostrar en tiempo real la evolución temporal de las magnitudes en una gráfica.

En el apartado 9 se emplaza la explicación sobre el modo de funcionamiento del equipo así como la calibración inicial requerida de los circuitos desarrollados en el apartado anterior. En la siguiente figura se representa el diagrama de bloques que conforma el sistema desarrollado.

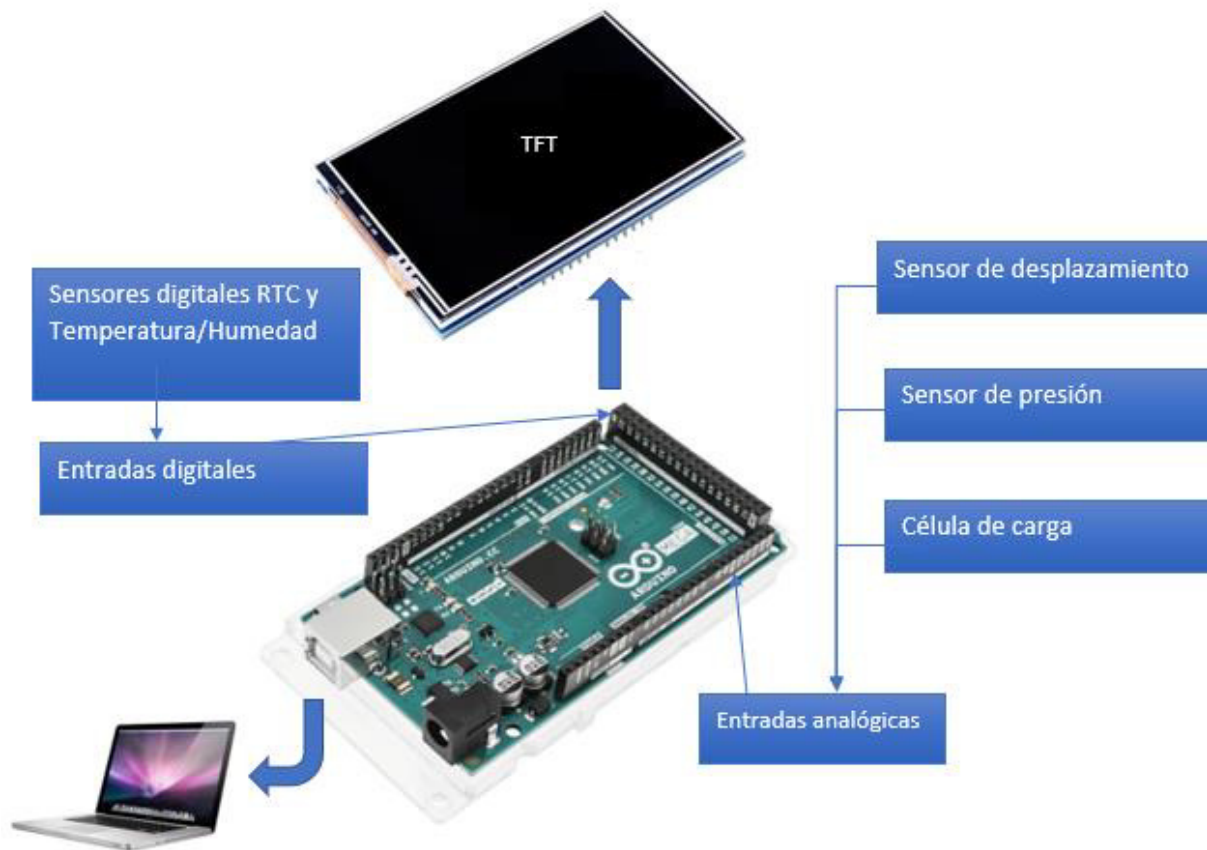


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema

6 PALABRAS CLAVE

Sensor

Transductor

Instrumentación

Adquisición



7 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

7.1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería geológica se define como la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas que surgen como consecuencia de la interacción del ser humano con el medio ambiente. Con el propósito de poder evitar riesgos geológicos e impactos ambientales, se lleva a cabo el estudio del terreno y poder llevar a cabo obras de distinta índole como: infraestructuras, edificación, explotaciones mineras o hidráulicas.

Los estudios geotécnicos nos permiten obtener las condiciones y propiedades del terreno, los diferentes ensayos que se realizan permiten conseguir los parámetros que determinan el comportamiento geomecánico del mismo como por ejemplo son la permeabilidad, la resistencia o la deformabilidad entre otros.

Los sistemas registradores o capturadores de datos también conocidos como *dataloggers*, posibilitan la toma de valores de las distintas magnitudes del terreno. Estos están condicionados por el número de sensores que puede interpretar y sus características, también por la frecuencia del muestreo, así como por la posibilidad de visualización en tiempo real de los valores obtenidos.

El sistema que se va a desarrollar a lo largo de este proyecto tiene la capacidad de obtener la lectura de presión, fuerza y desplazamiento para obtener las propiedades de resistencia y deformabilidad del terreno.



7.2 DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Las estructuras, en su mayoría, son concebidas para el terreno en el que se pretende construir, por tanto, el papel del suelo como elemento de cimentación es de suma importancia. La respuesta del suelo frente a la alteración como consecuencia de excavaciones, aplicaciones de cargas, etc. depende de la constitución y características que este tenga, así como de los condicionantes geológicos del entorno en el que se ubique.

El suelo como tal tiene una amplia gama de definiciones, tradicionalmente se ha definido como suelo a las partículas orgánicas e inorgánicas que se encuentran por encima o en la capa de la corteza rocosa terrestre. Su origen, sin embargo, se sitúa en los macizos rocosos existentes que han sido sometidos a la erosión producida por diferentes fenómenos ambientales y de diferente naturaleza tales como:

- Física, debida a los cambios de temperatura y a la acción del agua. Estas acciones tienen a romper la roca madre en fragmentos de tamaño más reducido
- Química, producida por fenómenos de hidratación, oxidación, cementación, disolución etc. Derivados también de la acción del agua
- Biológica, generada por la actividad bacteriana y a la putrefacción capaces de actuar como catalizadores.

Para poder seguir una metodología de una manera normalizada para los suelos, se clasifican en cuatro grandes grupos en función de su granulometría, es decir, del tamaño de las partículas que lo componen. Mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS Unified Soil Classification System)¹, también conocido como clasificación modificada de Casagrande, incluido en el estándar D2487 de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM)². Los cuatro grupos en los que se clasifica el suelo son:

1. Gravas, con un tamaño de grano de entre 80-100mm y 2mm
2. Arenas, partículas comprendidas entre 2mm y 0,06mm
3. Limos, con un tamaño de entre 0,06 mm y 0.02mm
4. Arcillas, inferiores a 0.02mm

¹ https://lauwtjunnji.weebly.com/uploads/1/0/1/7/10171621/astm_d-2487_classification_of_soils_for_engineering_purposes_unified_soil_classification_system.pdf

² <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>



En la Tabla 1 se amplía la clasificación y características de los distintos tipos de suelo.

DIVISIONES PRINCIPALES		DEL GRUPO	DENOMINACIÓN TÍPICA	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN	
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50% es retenido en el tamiz nº 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido por el tamiz nº 4	GRAVAS LIMPIAS	GW	Clasificación basada en el porcentaje de finos que pasan por el tamiz nº 200 (0.80 UNE) Menos del 5%: GW, GP, SW, SP Más del 12%: GM, GC, SM, SC Del 5 al 12%: Casos intermedios que requieren el uso de doble símbolo	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ entre 1 y 3
			GP		Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para GW
		GRAVAS CON FINOS	GM		Debajo de la línea A o $IP < 4$
			GC		Por encima de la línea A o $IP > 7$
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz nº 4	ARENAS LIMPIAS	SW		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ entre 1 y 3
			SP		Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para SW
		ARENAS CON FINOS	SM		Debajo de la línea A o $IP < 4$
			SC		Por encima de la línea A o $IP > 7$
SUELOS DE GRANO FINO 50% o más pasa por el tamiz nº 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido igual o menor que 50	ML	Limos inorgán., arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas	<p>ECUACIÓN DE LA LÍNEA A: $IP = 0.73 (LL - 20)$</p> <p>Los casos intermedios requieren doble símbolo</p>	
		CL	Arcillas inorgán. de plastic. baja o media, arcillas con grava, arenosas, o limosas		
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad		
	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos con mica o diatomeas, limos clásticos		
		CH	Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad		
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media o elevada		
	SUELOS DE ESTRUCTURA ORGÁNICA		PT	Turbas, fangos y otros suelos de alto contenido orgánico	Fácilmente identificables por presencia de raíces, hojas y materia vegetal fibrosa en descomposición, así como color marrón oscuro o negro, olor y tacto suave

Tabla 1. Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos



7.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

7.3.1 Cohesión

La cohesión es una medida de la fuerza entre las partículas minerales que conforman el suelo. En lo que se refiere a mecánica de suelos, esta se utiliza para representar la resistencia al corte producida por el proceso de la cementación, es decir, cuando los poros del terreno se rellenan con sustancias solidas de origen químico. Mientras que desde un punto de vista más físico este término se utiliza para representar la tensión mecánica a la que está sometido.

En suelos mayoritariamente granulares, en los cuales no hay presencia de ningún tipo de material que pueda producir adherencia entre las partículas, se reconoce como un valor de cohesión nulo, denominándose este como suelo no cohesivo.

En los suelos granulares no se generan fuerzas intermoleculares, pero si en el caso de las arenas, donde se desarrolla un fenómeno denominado cohesión aparente, debido a la fuerza de la tensión desarrollada por el agua, que llega a limitar el movimiento de las partículas de menor tamaño en torno a unos 0.05mm – 5mm.

7.3.2 Porosidad, índice de vacío y saturación

Se trata de magnitudes que describen los espacios vacíos en un material, donde dicho vacío puede contener aire o agua.

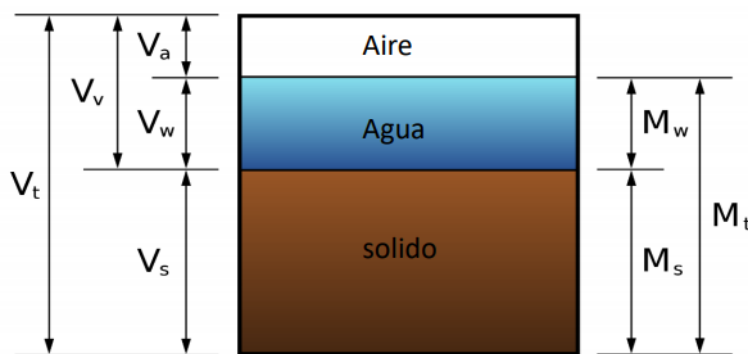


Figura 4. Fases que conforman un suelo

Se define la porosidad (ϕ) como la relación entre el volumen de vacío total en el espacio (En la figura anterior denominado como V_v , siendo el resultado de la suma del volumen de aire, V_a , y el volumen de agua, V_w) y el volumen total del material (V_t).



$$\phi = \frac{V_a + V_w}{V_t} = \frac{V_v}{V_t}$$

Ecuación 1. Porosidad

El índice de vacío o índice de poros (e), se define como la relación entre el volumen de vacío total (Vv) y el volumen de los sólidos (Vs).

$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V_v}{V_s}$$

Ecuación 2. Índice de vacío

Mientras que la saturación se define como el porcentaje de la relación entre el volumen de agua (Vw) y el volumen de vacío total (Vv)

$$S_r = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{V_w}{V_v}$$

Ecuación 3. Saturación

7.3.3 Densidad y peso unitario

La densidad ρ es la masa por unidad de volumen de un material, pero en los estudios de geotecnia es más utilizada la magnitud conocida como peso unitario. Se define como la fuerza por unidad de volumen siendo el resultado de multiplicar la densidad del material por la aceleración de la gravedad terrestre ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), las unidades del peso unitario son del orden de kN/m^3 .

Material	Densidad (g/cm^3)	Peso unitario (kN/m^3)
Aire	0	0
Agua	1	9.81
Arenisca	2.0-2.6	19.5-25.5
Caliza	2.5-2.8	24.5-27.5
Granito	2.5-2.8	24.5-27.5
Basalto	2.7-3.1	26.5-30
Roca	2.6-3.0	25.5-30

Tabla 2. Densidad y Peso unitario de geomateriales

7.3.4 Consistencia (Límites de Attenberg)

El científico sueco Albert Mauritz Attenberg (1846-1916), especialista en suelos, propuso tres estados de consistencia del terreno. Estos límites de consistencia están establecidos por el contenido de agua y son los siguientes:

- Limite liquido (W_L). Es el contenido mínimo de humedad por el cual el suelo se encuentra en un estado plástico y puede moldearse. El límite líquido se determina amasando bien el suelo seco con bastante agua y extendiendo la masa resultante sobre un molde denominado *Cuchara de Casagrande*. Se realiza un surco con un acanalador normalizado, dividiendo el suelo en dos mitades, a continuación haciendo girar la manivela se golpea la masa contra la base de la máquina, hasta que dicho surco se cierra en una longitud de 1/2" (12.7mm). Si el número de golpes para cerrarlo son 25 la humedad corresponde al límite líquido. Dada la dificultad para conseguir esta condición se determina por interpolación a partir de dos muestras en las que debe cerrarse esos aproximados 13mm con más o menos golpes que los 25 mencionados³.



Figura 5. Cuchara de Casagrande, imagen procedente de <https://web.ua.es/es/ginter/documentos/ensayos-flash/wl.swf>

- Limite plástico (W_P). El contenido mínimo de humedad por debajo del cual el suelo ya no se comporta como un material plástico, sino semisólido. El intervalo entre los límites líquido y el plástico es cuando el suelo se comporta como un material plástico y se denomina índice plástico o de plasticidad ($I_P = W_L - W_P$). Se determina amasando una mezcla de suelo y agua contra una

³ Norma UNE-EN ISO 17892-12:2019: Determinación del límite y del límite plástico.



superficie inerte y lisa hasta alcanzar la forma de un cilindro con un diámetro de unos 3mm y 25-30mm de longitud si se cuartea en fracciones de unos 6mm su humedad es la del límite plástico, si no se cuartean se desarman y vuelven a amasar para que pierdan humedad.

- Límite de contracción o retracción (W_s). Es el contenido de agua que tiene un suelo que ya no disminuye su volumen al perder humedad con un secado adicional.

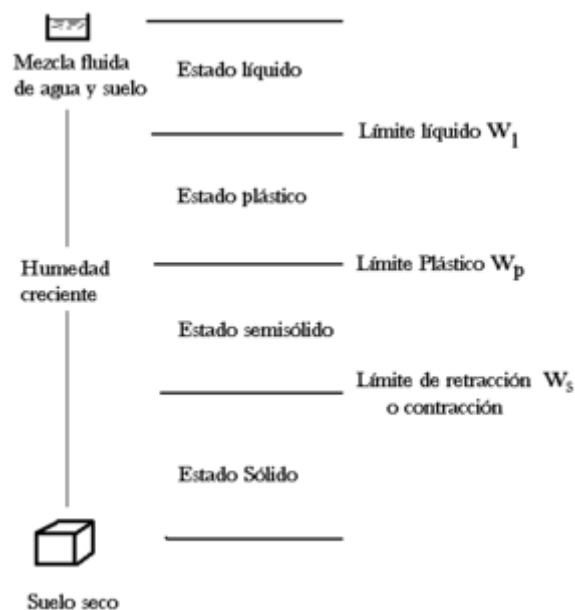


Figura 6. Límites de Atterberg. Imagen procedente de https://ceramica.fandom.com/wiki/L%C3%ADmites_de_Atterberg

7.3.5 Gravedad específica

La gravedad específica se define como la relación entre el peso unitario del material y el peso unitario del agua, los valores típicos para minerales del suelo se pueden ver en la tabla 3:

Mineral	Gravedad Específica
Yeso	2.3
Feldespatos Ortoclásico	2.56
Cuarzo	2.6
Caolinita	2.6-2.63
Calcita	2.8-2.9
Muscovita (mica)	2.8-2.9
Aragonita	2.94
Olivina	3.27-3.37
Hematita	4.9-5.3
Magnetita	5.17-5.18

Tabla 3. Valores de gravedad específica típicos para minerales del suelo



7.3.6 Consolidación

Como consecuencia de la construcción de cimientos y otras cargas, conlleva un aumento de la tensión normal σ que incide sobre las distintas capas del suelo. Comprimiéndolas por la deformación y reorientación de sus partículas y por la expulsión del aire o agua de los espacios vacíos. El asentamiento del suelo debido a la carga podría caracterizarse de dos tipos:

- Asentamiento elástico, originado por la deformación elástica del suelo sin que llegue a variar el contenido de humedad. Para el cálculo de dicho asentamiento se recurre a la teoría de elasticidad o ley de Hooke que establece que el alargamiento unitario es directamente proporcional a la fuerza aplicada⁴.
- Asentamiento de consolidación, es el debido al cambio de volumen de un suelo cohesivo y saturado como consecuencia de la expulsión del agua presente en el interior de los poros. Este proceso de cambio es dependiente del tiempo.

En el momento que un suelo saturado se somete a una tensión, la presión del agua intersticial (interior de los poros) se incrementa repentinamente. En los suelos de tipo arenosos con una alta permeabilidad, el drenaje causado por el aumento en la presión del agua intersticial viene acompañado de una reducción en el volumen de suelo, lo que se traduce en que el asentamiento del suelo es debido a que tanto el asentamiento elástico como de consolidación ocurren de manera simultánea.

Cuando se trata de una capa de suelo arcilloso compresible saturado y se somete a un aumento de la tensión, el asentamiento elástico se produce de manera inmediata, debido a que el movimiento del agua en la arcilla es considerablemente menor que en el caso de la arena, con lo que el exceso de presión generado por la carga va disminuyendo de una manera gradual. Por tanto, el cambio de volumen en la arcilla puede llegar a prolongarse tiempo después que el asentamiento elástico.

⁴ La ley de Hooke establece que el alargamiento de un muelle es directamente proporcional al módulo de la fuerza que se le aplique, siempre y cuando no se deforme permanentemente dicho muelle

https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_profesores/prof121896/docencia/propiedades_mecanicas.pdf



7.3.6.1 Ensayo edométrico

Para poder determinar la velocidad y grado de asentamiento que experimentará un suelo arcilloso saturado, se somete una muestra de este a un ensayo edométrico. Dicho ensayo consiste en una aplicación de incrementos de carga, las deformaciones debidas a la aplicación de carga son el resultado de una disminución del volumen total (V_t) y del volumen de vacíos (V_v), para su realización en laboratorio se utiliza un equipo conocido como edómetro que aplica a la probeta del suelo una secuencia de cargas axiales midiendo la disminución de la altura que se produce durante un periodo de tiempo determinado.

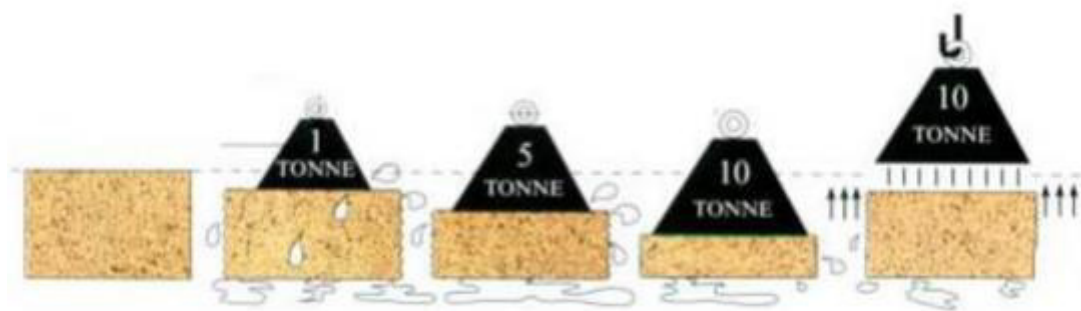


Figura 7. Proceso de consolidación

El proceso del ensayo es el siguiente:

1. Se aplica una carga inicial pequeña según el tipo de terreno
2. Se mantiene la carga hasta la consolidación
3. Se realizan nuevos escalones de carga duplicándola
4. Se descarga por escalón
5. En cada escalón se mide la altura de la muestra.

De dicho ensayo se obtiene lo que se conoce como curva edométrica, en la que relaciona las presiones efectivas $-\sigma'$ y el índice de poros $-e$ alcanzado en la consolidación. Las tres ramas que describe la curva son la rama de compresión noval, la rama de descarga y la rama de recarga

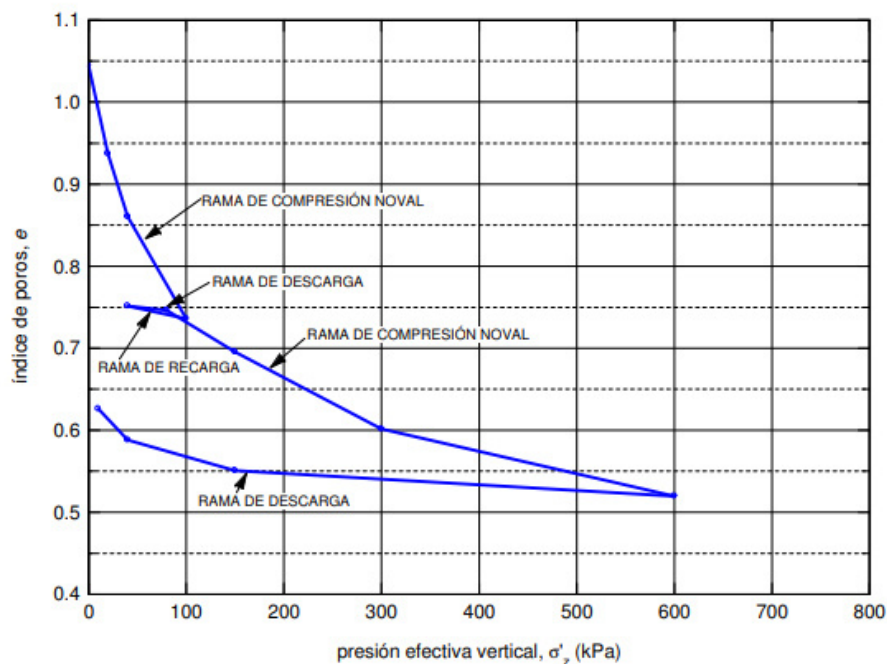


Figura 8. Curva edométrica

La rama de compresión noval viene representada por la ecuación siguiente:

$$e_1 - e = C_c \log_{10} \frac{\sigma'}{\sigma'_1}$$

Ecuación 4. Rama de compresión noval

Donde C_c es el parámetro índice de compresión relacionado con la cantidad de consolidación que tendrá lugar, mientras que e_1 y σ_1 son el índice de poros y la presión efectiva de un punto de la recta de compresión.

En cada rama de descarga la ecuación es parecida pero la constante C_s recibe el nombre de índice de hinchamiento o entumecimiento resultando la ecuación de la siguiente forma:

$$e_1 - e = C_s \log_{10} \frac{\sigma'}{\sigma'_1}$$

Ecuación 5. Rama de descarga

El procedimiento del ensayo viene reflejado en la norma UNE-EN ISO17892-5:2019⁵ “Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 5: Ensayo edométrico de carga incremental”

⁵ <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0061866>



7.4 ENSAYOS DE DEFORMABILIDAD Y RESISTENCIA DE LOS SUELOS

7.4.1 Introducción

La resistencia a tracción del suelo, es decir, cuando se somete a fuerzas en sentido opuesto y misma dirección, es prácticamente inexistente. En casos muy concretos, como el caso de las rocas y en los suelos parcialmente saturados, puede tener cierta relevancia el máximo esfuerzo axial de tracción que pueden soportar antes que lleguen a romperse. Debido a esto el interés se centra en la resistencia cortante de un suelo, es decir, en la resistencia interna por unidad de área que el suelo puede ofrecer a la rotura y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano. Para poder calcular esta resistencia al corte es preciso dar a conocer primero el modelo de Mohr-Coulomb.

7.4.2 Modelo de Mohr-Coulomb⁶

Charles-Agustin de Coulomb postuló en 1776 que la resistencia al deslizamiento por unidad de superficie (τ) en un plano se debe sólo al rozamiento entre partículas, y por tanto que era proporcional a: la tensión normal (σ) que actúa en dicho plano, es decir a la suma de fuerzas normales dividido entre la superficie total; y también al coeficiente de rozamiento, el cual definió como la tangente de un ángulo conocido como ángulo de rozamiento interno del suelo (φ). Además, supuso que podía haber otro factor añadido de valor constante e independiente de la tensión normal el cual denominó cohesión, c . Por lo que la relación de los distintos factores se define como:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Ecuación 6. Criterio de rotura de Coulomb-Mohr

En el 1900 el ingeniero alemán Christian Otto Mohr presento la teoría en que un material se rompe debido a una combinación crítica de la tensión normal (σ) y de la tensión cortante o tangencial (τ), y no de cualquier tensión máxima normal o tangencial únicamente. Por tanto, la relación entre ambas se podría definir de la forma:

$$\tau = f(\sigma)$$

Ecuación 7. Relación entre tensión normal y tangencial

⁶ Figuras procedentes de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1555/course/section/2012/capitulo6.pdf>

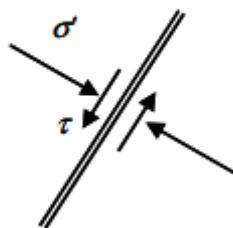


Figura 9. Tensiones en plano de deslizamiento

En 1925 el ingeniero austriaco Karl Von Terzaghi estableció además el principio de tensión efectiva, en el que la tensión normal en el suelo saturado es la suma de la tensión efectiva realizada por los sólidos del suelo (σ') más la presión intersticial producida por el agua en el interior de los poros (u).

$$\sigma = \sigma' + u$$

Ecuación 8. Tensión normal total

Reescribiendo la ecuación, el criterio de rotura de Coulomb-Mohr queda determinado como:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi = c' + \sigma' \tan \varphi$$

Ecuación 9. Criterio de rotura de Coulomb-Mohr extendido

Donde:

τ = Resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano.

c' = Cohesión efectiva. Representa la máxima resistencia tangencial en un plano en el caso que la tensión efectiva normal σ' sea nula. Su valor para arena y limo inorgánico es 0. Para arcillas normalmente consolidadas, c' se puede aproximarse a un valor de 0, en caso de ser sobreconsolidadas tienden a valores mayores que 0.

σ' = Tensión efectiva normal. Antes de cargar un terreno existen unas tensiones totales debidas a su propio peso y a presiones intersticiales del agua en los poros, ambas normalmente reducidas según el drenaje que tenga. Cuando se empieza a construir sobre el terreno están tensiones aumentan, pudiendo ser las efectivas menores si no hay un drenaje o un poco mayores en el caso que si lo haya. Un momento crítico es en el caso que no haya drenaje y con el paso del tiempo las presiones intersticiales disminuyan y las totales se mantengan, por lo que las efectivas aumentan subiendo la resistencia del terreno.

φ = Ángulo de rozamiento interno del suelo.

La ecuación 9 expresa la condición de deslizamiento a lo largo de un determinado plano previamente conocido, dado que no siempre pueden ser conocidos a priori los planos de rotura o la situación no es clara, es necesario trasladar el criterio de rotura y las tensiones aplicadas al eje de coordenadas.

La condición de rotura resultante se conoce como criterio de Mohr-Coulomb, y se representa gráficamente mediante lo que se conoce como diagrama de Mohr. Un ejemplo queda reflejado en la siguiente figura:

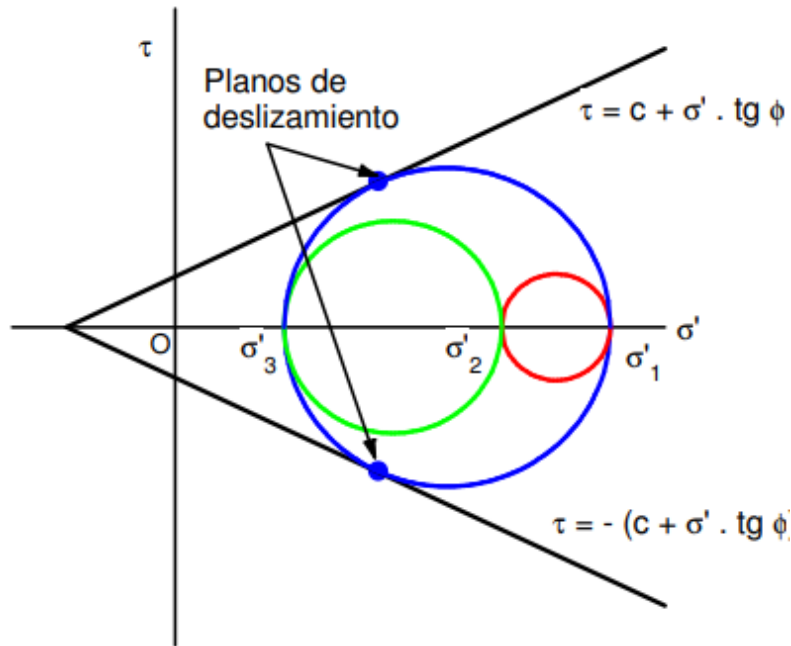


Figura 10. Diagrama de Mohr

El estado tensional representado por los círculos rojo (σ'_1 - σ'_2) y verde (σ'_2 - σ'_3) no llegan a alcanzar la envolvente de rotura, son por tanto un estado posible y seguro ya que representa que el suelo no ha llegado a rotura.

La condición de rotura se encuentra en el círculo azul (σ'_1 - σ'_3), que corresponde al estado tensional (mayor que σ'_3 y menor que σ'_1) cuyo círculo de Mohr es tangente a lo que se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura de suelo.

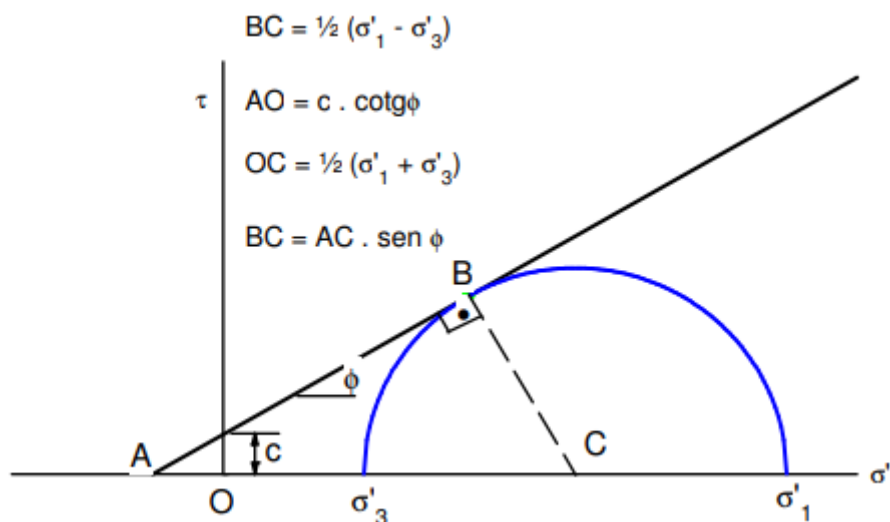


Figura 11. Diagrama de Mohr, condición de rotura



Para calcular la combinación de tensiones normales y tangenciales que corresponden a la coordenada más alta del círculo de Mohr, que representa la resistencia máxima al corte, se determina como:

$$\tau = c' \cos \varphi + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \cdot \sin \varphi$$

Ecuación 10. Cálculo de coordenada más alta del círculo de Mohr

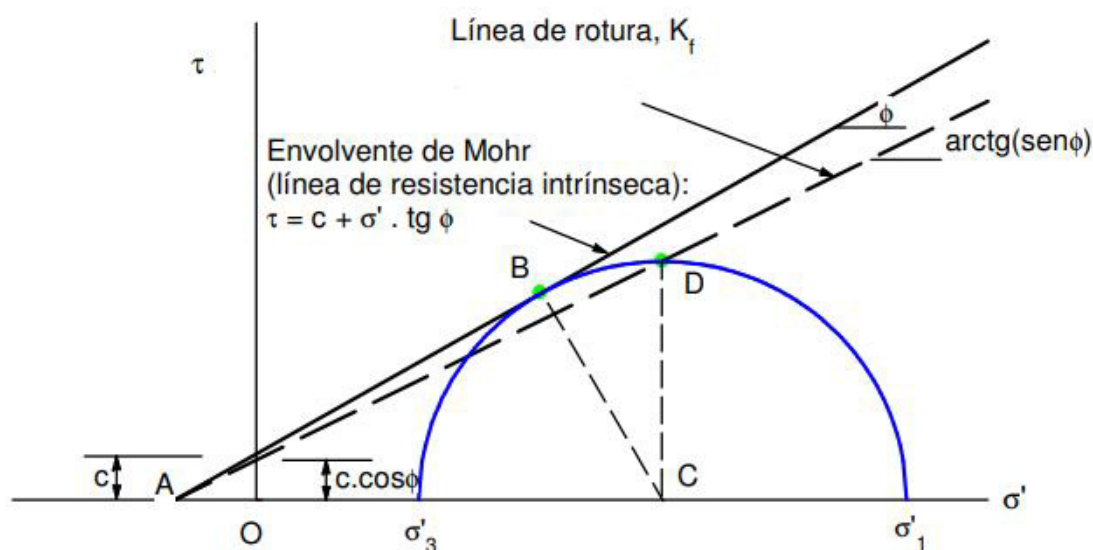


Figura 12. Coordenada más alta círculo de Mohr

7.4.3 Descripción de los ensayos

Los ensayos para determinar la resistencia mecánica y la deformabilidad del suelo se dividen en dos grupos: los que se realizan en laboratorio y los que se realizan in situ sobre el terreno. Herramientas como los sistemas registradores de datos permiten en ambos casos obtener los parámetros necesarios para su estudio.

En lo que respecta a los ensayos de resistencia pueden destacar, debido a que proporcionan por si mismos parámetros de cálculo, el ensayo de corte directo y los ensayos axiales. Mientras que, para el estudio de la deformación, además del ensayo edométrico anteriormente descrito, destaca el ensayo presiométrico ya que realiza la medición de tensión y deformación simultáneamente, pudiéndose este catalogar tanto como ensayo de resistencia como de deformación a la vez, aunque su objetivo principal sea la medición de la deformación del terreno. Un breve resumen de los ensayos que se van a describir sería:



Ensayos en laboratorio	Ensayos in situ
Resistencia al corte	Resistencia al corte en bloques
Triaxial	Presiométrico
Compresión simple	Placa de carga

7.4.3.1 Ensayos en laboratorio

7.4.3.1.1 Ensayo de corte directo

El ensayo de corte directo se utiliza para calcular la resistencia del terreno. La prueba en laboratorio consiste en introducir una muestra del suelo en el interior de un molde rígido, normalmente de sección de cuadrada, dividido en dos mitades. Encima de la muestra se coloca una tapa rígida sobre la que se pueda aplicar una tensión normal o repartida en el área de la probeta (tensión resultante de dividir la carga aplicada (N) entre la sección (Ω)).

Una prueba completa consiste en la aplicación, sobre un determinado terreno, de tres cargas verticales distintas sobre tres muestras del mismo material de manera constante y aumentar la tensión tangencial τ hasta alcanzar la rotura de la muestra, midiendo los desplazamientos relativos horizontales y verticales dx y dz como se puede ver en la figura 13.

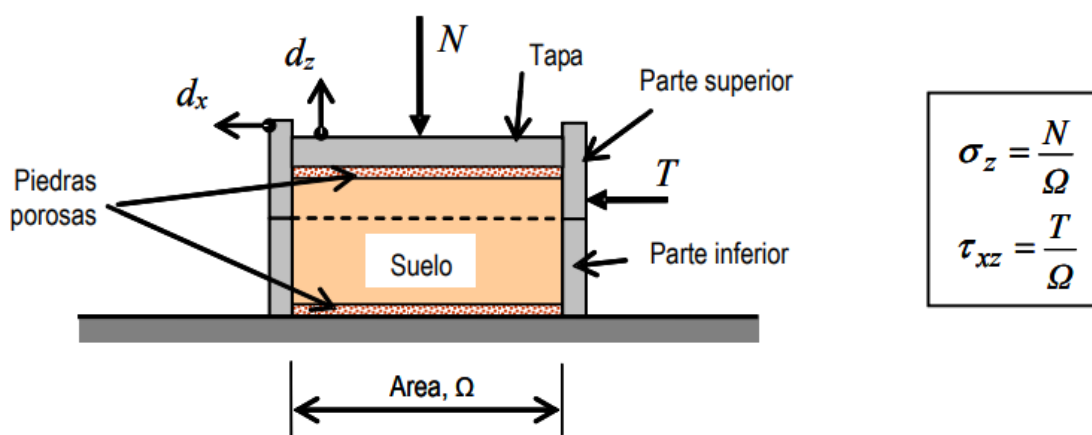


Figura 13. Disposición de la muestra, fuerzas y desplazamientos. Imagen procedente de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1555/course/section/2012/capitulo6.pdf>

Como resultado de los tres ensayos se presentan los puntos de rotura en el diagrama de Mohr y para cada muestra la curva de evolución de la tensión tangencial τ y del desplazamiento longitudinal de la muestra en función de la tensión normal aplicada.

En resumen, el proceso del ensayo suele ser el siguiente:

- Se aplica una tensión total vertical N
- Si el ensayo se realiza sobre una muestra saturada se deja consolidar hasta que se minimicen el exceso de presión intersticial, momento en el cual la tensión total aplicada pasa a ser efectiva.
- Se aplica a la parte inferior, o a la parte superior indistintamente, del molde una velocidad constante de corte horizontal y se mide a intervalos de tiempo determinados la reacción T para impedir el desplazamiento de la parte inmóvil de la muestra.
- En los mismos intervalos de tiempo se mide el desplazamiento vertical de la muestra, de manera de poder obtener los cambios de volumen del suelo.

7.4.3.1.2 Ensayo triaxial

En el ensayo triaxial el objetivo es aplicar tensiones normales diferentes tanto en dirección horizontal como vertical sobre una probeta cilíndrica, de esta manera las tensiones y deformaciones son iguales en todas las direcciones horizontales. Este ensayo presenta una gran versatilidad y permite la obtención de una variada información sobre la resistencia del suelo en diversas condiciones controlables en laboratorio.

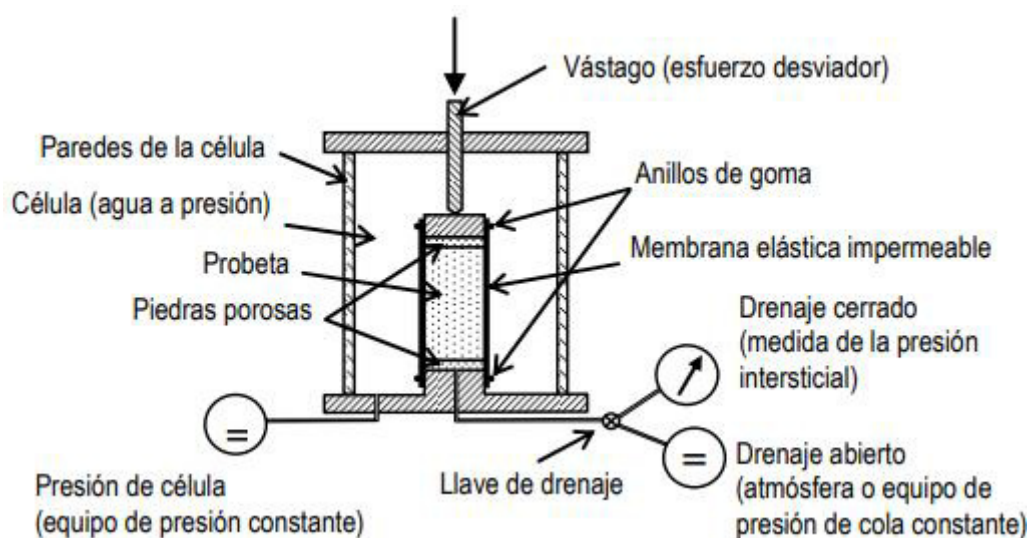


Figura 14. Célula triaxial. Imagen procedente de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1555/course/section/2012/capitulo6.pdf>

El ensayo consiste en preparar una probeta cilíndrica, de altura el doble de su diámetro, rodeada de una membrana impermeable, al mismo tiempo se controla el drenaje y la presión intersticial colocando piedras porosas en la base y en la parte superior de la muestra. La probeta se introduce en una célula cilíndrica en cuyo interior se introduce agua a presión, proporcionando una tensión total e isótropa sobre la muestra.



A continuación, se aplica mediante un vástago una carga vertical, penetrando en la célula por su parte superior. Una vez superada la presión sobre el área del vástago que produce el agua, la fuerza adicional producida dividida entre el área de la probeta conforma un incremento en la tensión normal vertical conocida como esfuerzo desviador que indica la diferencia entre las tensiones principales mínima y máxima

A partir de una o en las dos bases de la probeta se dispone un conducto llamado línea de drenaje, este tubo permite aplicar al agua que rellena los poros la presión intersticial deseada además de controlar la entrada y salida del agua de la probeta, permitiendo así la medida de los cambios de volumen del suelo. En el caso del drenaje cerrado, conectando el conducto a un transductor de presión intersticial permite medir en todo momento dicha presión en la muestra.

Se trata de estudiar la rotura, por lo que todo en conjunto se introduce en una prensa de deformación controlada, midiendo la carga ejercida y aplicándola a una velocidad constante.

7.4.3.1.3 Ensayo compresión simple axial

Este ensayo consiste en colocar, al igual que en el ensayo triaxial, una probeta cilíndrica de suelo de altura entre 2-2.5 veces su diámetro y romperla a compresión sin ningún tipo de membrana ni limitación lateral en una prensa:

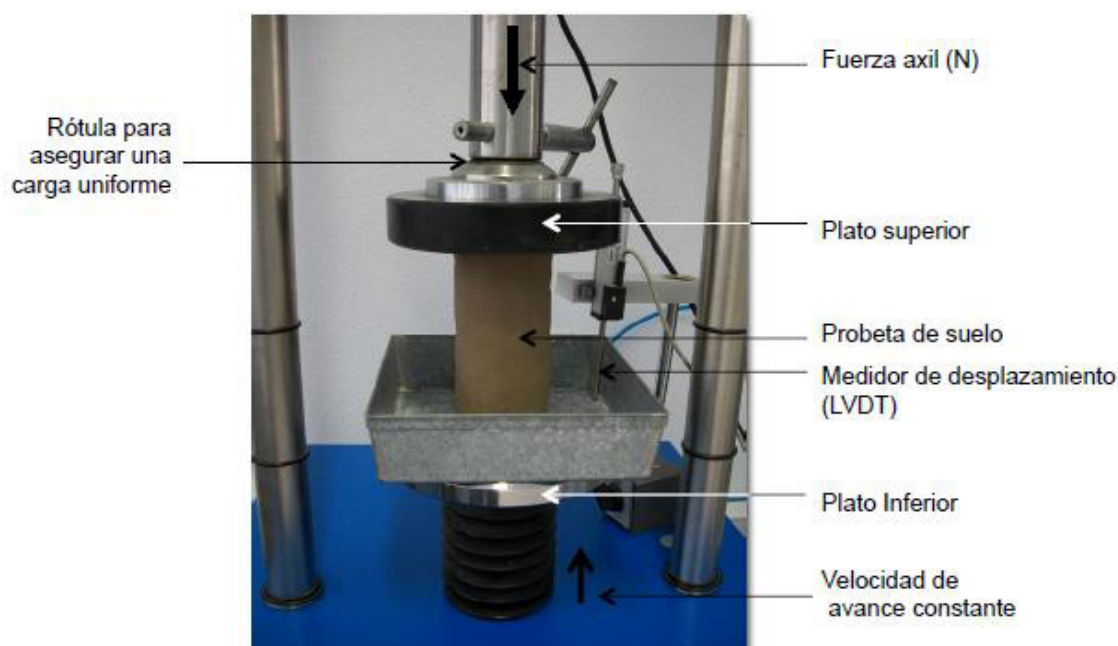


Figura 15. Ensayo de compresión simple. Imagen procedente de <https://web.ua.es/es/ginter/documentos/ensayos/compresion-simple.pps>



Tras colocar la probeta en la prensa, se aplica una carga de tal forma que produzca una deformación axial, midiendo dicha deformación y la carga en un intervalo de tiempo determinado hasta que la carga comience a disminuir o que la deformación axial haya alcanzado un 15%. En función de la resistencia a la compresión simple, resultado de dividir la carga de rotura y el área corregida de la probeta, se clasifica la consistencia de la arcilla tal como se refleja en la siguiente tabla:

Consistencia de la arcilla	Resistencia a la compresión (kPa)
Muy blanda	<25
Blanda	25-50
Medianamente firme	50-100
Firme	100-200
Muy firme	200-400
Dura	>400

Tabla 4. Consistencia de la arcilla

La carga de rotura es el valor máximo alcanzado antes o bien de disminuir o bien de la deformación del 15%, mientras que el área corregida se calcula como:

$$A_c = \frac{\pi \frac{\theta^2}{4}}{1 - \varepsilon_{rotura}}$$

Ecuación 11. Área corregida de una probeta

Donde θ es el diámetro del cilindro y ε la deformación que hay en el momento de rotura.

7.4.3.2 Ensayos in situ

7.4.3.2.1 Ensayo de corte en bloques in situ

El ensayo de corte in situ ofrece un procedimiento para medir la resistencia de corte a lo largo de una superficie del terreno sin necesidad de realizar la extracción de muestras.

El procedimiento del ensayo es muy similar a las del ensayo de corte directo en laboratorio, con la diferencia que en cada probeta se realiza un mínimo de 3 cargas normales. Se aplica una tensión normal a la dirección del plano a ensayar y una tensión tangencial al plano midiendo los desplazamientos normales y tangenciales al plano.

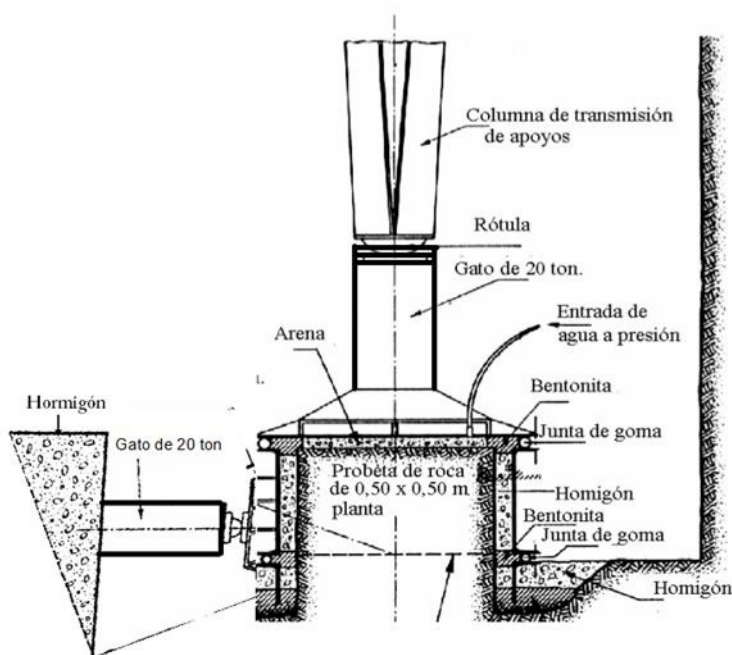


Figura 16. Esquema de un ensayo de corte in situ. Imagen procedente de Jiménez Salas J.A.; De Justo Alpañes J.L.; Serrano González A. (1981) *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas*.

Como ocurre normalmente con los ensayos in situ, este ensayo presenta una serie de ventajas frente a los ensayos de laboratorio y es que ofrece unos resultados complementarios. Por un lado, permiten reducir la alteración de la muestra que tiene lugar durante el proceso de extracción para los ensayos de laboratorio. Además, este tipo de ensayos permiten medir la resistencia al corte de muestras de mayor tamaño que las usualmente son utilizadas en laboratorio, y reduciendo por tanto los efectos de escala. Esto permite considerar el efecto de las rugosidades de mayor tamaño en la resistencia medida.



Figura 17. (1) Tallado de una muestra, (2) Muestra preparada para ensayo. Imágenes cortesía de Corelogs Ingeniería SL



El objetivo final del ensayo de corte in situ es conocer la resistencia de pico y residual del plano ensayado a diferentes tensiones normales aplicadas en la misma probeta. En términos generales, fijada una tensión normal, las curvas de tensión de corte – desplazamiento siguen la forma indicada en la siguiente figura:

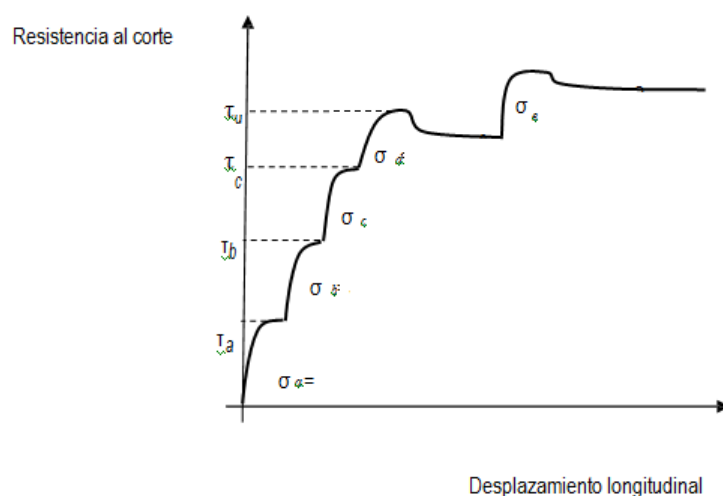


Figura 18. Curva tensión de corte – desplazamiento horizontal estimada durante los ensayos de corte in situ a diferentes cargas normales aplicadas $\sigma_a < \sigma_b < \sigma_c < \sigma_d < \sigma_e$

7.4.3.2.2 Ensayo presiométrico

El ensayo presiométrico consiste en aplicar gradualmente una presión, en dirección radial, mediante la utilización de una sonda cilíndrica dilatante en el interior de un sondeo o taladro. Analizando el desplazamiento que se produce in situ en el terreno.

La puesta en marcha del sistema se realiza introduciendo o bien mediante gas a presión (normalmente nitrógeno o aire comprimido) de hasta 20 MPa o bien mediante una bomba de agua a través de una camisa de caucho. Realizando la lectura de las deformaciones debidas a variaciones de volumen con sensores de desplazamiento tales como galgas extensiométricas o bien lectores LVDT, que permiten alcanzar presiones de trabajo mayores (en torno de 20 a 30 MPa) y son más precisos y fáciles de calibrar. La lectura se toma electrónicamente con registradores digitales para la captura de datos.

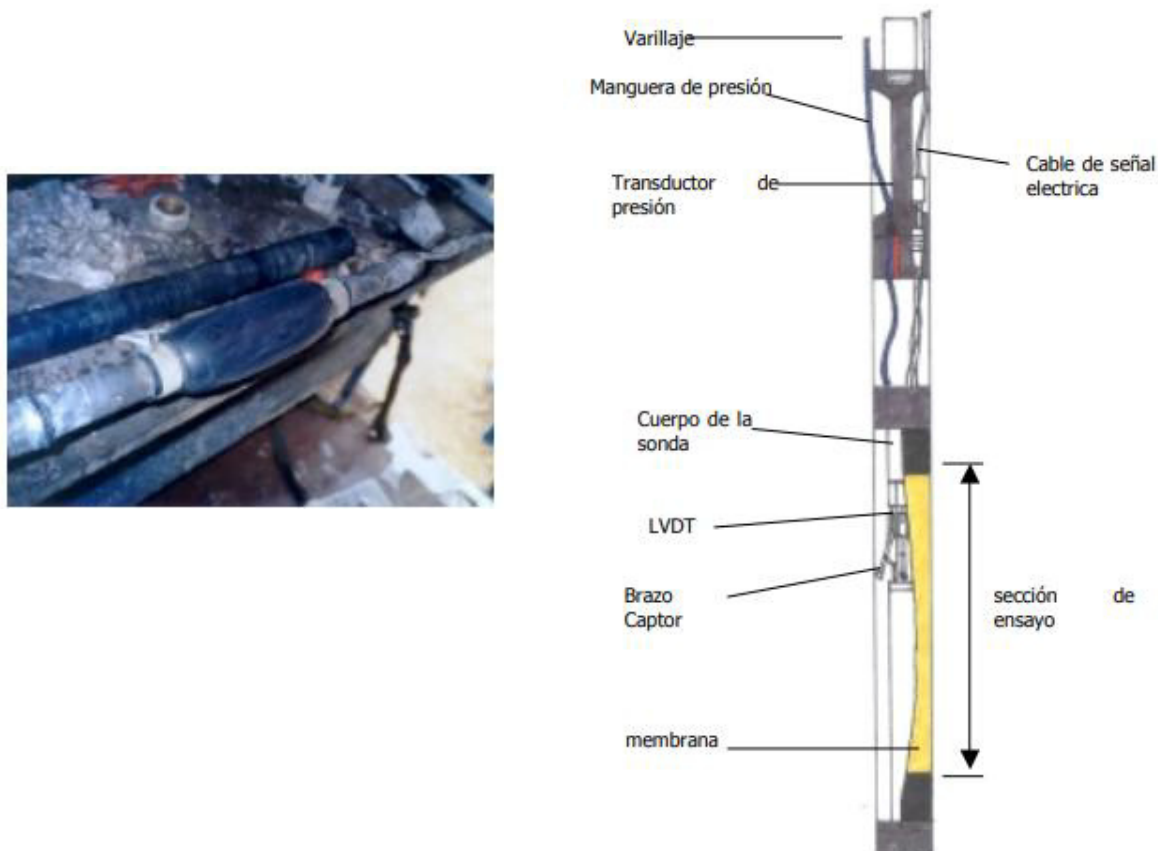


Figura 19. (Izq) Sonda volumétrica Ménard (Dcha) Sonda presiométrica. Imágenes provenientes de <https://deca.upc.edu/ca/el-departament/seccions/etcg/docencia/aula-paymacotas/pdf/publicacions/ensayo-presiometrico.pdf>

El objetivo final del ensayo es obtener una curva que relacione la presión aplicada al suelo y su deformación, y así poder interpretar las propiedades del terreno. Para conseguirlo se somete a una cavidad de forma cilíndrica de radio r a una presión radial p , las variaciones del radio al incrementarse la presión están relacionadas por la expresión:

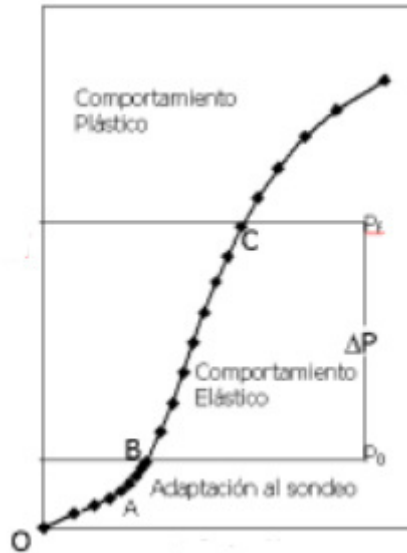
$$\Delta r = \frac{1 + \mu}{E_p} \cdot \Delta p \cdot r$$

Ecuación 12. Incremento del radio ensayo presiométrico

Donde μ es el coeficiente de Poisson⁷ y E_p el módulo de deformación presiométrico del terreno. Un ejemplo de curva presiométrica es la mostrada en la figura siguiente:

⁷ En todo cuerpo, cuando se produce una deformación en la dirección de la fuerza aplicada, se produce a su vez un cambio en su sección. La relación entre ambas deformaciones viene definida por el coeficiente de Poisson μ .

Incremento de Presión
(MPa)



Incremento del radio por deformación (mm)

Figura 20. Curva presiométrica bruta

El tramo O-A corresponde con la expansión de la membrana de caucho hasta que entra en contacto con las paredes del sondeo ya que el radio de la cavidad (r) es ligeramente superior al de la sonda. El tramo A-B corresponde con la adaptación de la membrana con la cavidad. El tramo lineal B-C representa el comportamiento elástico del suelo hasta alcanzar el punto C, correspondiente con lo que se conoce como presión fluencia, momento en el cual comienza la zona plástica del ensayo, donde el terreno es capaz de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico y sin variaciones de volumen apreciables.

Obteniendo la pendiente de la curva presiométrica en el comportamiento elástico (tramo B-C) se obtiene la rigidez del terreno M , ($M = \Delta p / \Delta r$). Si se relaciona con la ecuación 12, el módulo de deformación presiométrico E_p se calcula como:

$$E_p = (1 + \mu) \cdot M \cdot r$$

Ecuación 13. Módulo de deformación presiométrico

7.4.3.2.3 Ensayo de placa de carga

Este tipo de ensayo al igual que en el de resistencia al corte, se realiza la lectura de carga y desplazamiento además del tiempo. Con el fin de obtener el módulo de Young⁸.

Este tipo de ensayos se suele emplear en cimentaciones y consiste en situar una placa de carga sobre el terreno y medir los desplazamientos que sufren al aplicar una carga conocida mediante el uso de una bomba o un gato hidráulico. Utilizándose como carga de reacción la pared opuesta, en caso de encontrarse en el interior de una galería, o una plataforma *ad hoc* para tal fin.



Figura 21. Ensayo de placa de carga con gato hidráulico, imagen procedente de http://www2.caminos.upm.es/departamentos/ict/lcweb/ensayos_suelos/carga_placa.html

⁸ Módulo de Young: relación entre la tensión aplicada y la deformación medida en el eje longitudinal de un material: $E = \sigma/\epsilon$.



7.5 SENSORES Y TRANSDUCTORES UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS

Con el fin de poder desarrollar los ensayos descritos, el sistema registrador debe ser capaz de adquirir datos de la medición de tres magnitudes físicas distintas: desplazamiento, carga (fuerza) y presión.

En un sistema de medida electrónico, el transductor es el encargado de convertir la magnitud física que se quiere medir en una señal eléctrica, mientras que el sensor es el dispositivo sensible que responde a la variación de la magnitud que se está midiendo, se diferencia respecto del transductor que su salida no es una señal eléctrica. Por ejemplo en el caso del sensor de desplazamiento inductivo de a continuación, el sensor sería el núcleo ferromagnético que realiza el desplazamiento, mientras que las bobinas del cuerpo sensor son las que hacen de transductor y transforman dicho movimiento en una señal eléctrica.

7.5.1 Desplazamiento

Para llevar a cabo la medida del desplazamiento de una manera precisa, se opta por la utilización de los sensores de desplazamiento inductivo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*, transformador diferencial de variación lineal) los cuales son capaces de alcanzar precisiones del orden de μm (10^{-6} m) o incluso de nm (10^{-9} m).



Figura 22. Sensor LVDT SM26

El principio de funcionamiento de este sensor se basa en el cambio de posición lineal de un núcleo ferromagnético en el interior del cuerpo sensor compuesto por bobinas, provocando una variación de la autoinducción entre el bobinado primario y secundario del interior de este, dando como resultado un cambio en la señal de salida proporcional al desplazamiento de dicho núcleo.

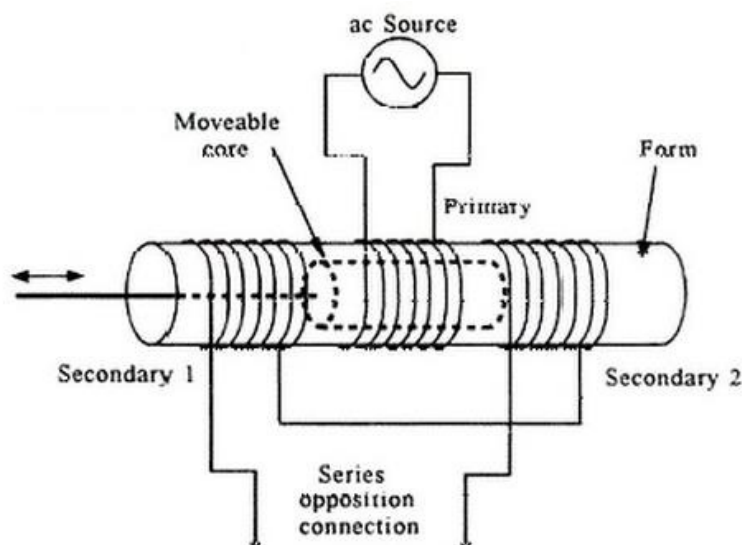


Figura 23. Disposición bobinas LVDT. Imagen procedente de <http://www.solenoidsupplier.com/displacement-sensor/>

La bobina interna del sensor se trata del devanado primario y las bobinas externas corresponden al secundario, siendo estas idénticas y conectadas en serie, pero con arrollamientos de manera inversa entre sí. Al conectar una fuente de corriente alterna al devanado primario se inducen tensiones de polaridad opuesta en los dos secundarios, dando como salida neta del transductor la diferencia entre las dos tensiones inducidas.

Cuando el núcleo está en una posición central, equidistante entre los dos devanados secundarios, los voltajes inducidos son iguales, pero de signo contrario, por lo que la tensión de salida resultante es nula.

Para la construcción del sistema registrador, el modelo elegido de LVDT es el SM260.24.2^s de la marca alemana *Schreiber Messtechnik*. Según indica el fabricante en su hoja técnica o datasheet, este sensor proporciona una medida de desplazamientos de hasta 24mm, con una variación de linealidad menor del 0,5% y una ganancia de 175mV / mm, con un error de medida de un $\pm 10\%$.

El fabricante igualmente proporciona una serie de circuitos acondicionadores de señal con el fin de facilitar la telemida del desplazamiento, consiguiendo prestaciones superiores en lo que respecta a ruido y exactitud. La tensión alterna de alimentación del sensor es aportada por un oscilador de 10Khz, el cual además realiza una modulación en amplitud de la señal medida con supresión de portadora. La señal de salida, para obtener el valor final de la medida, se realiza mediante una demodulación síncrona multiplicando la señal modulada por una tensión de referencia y filtrando la señal resultante con un filtro de paso bajo dando como resultado una señal continua de valor de 0 a 10 Vdc.

El diagrama de bloques del módulo queda reflejado en la siguiente figura:

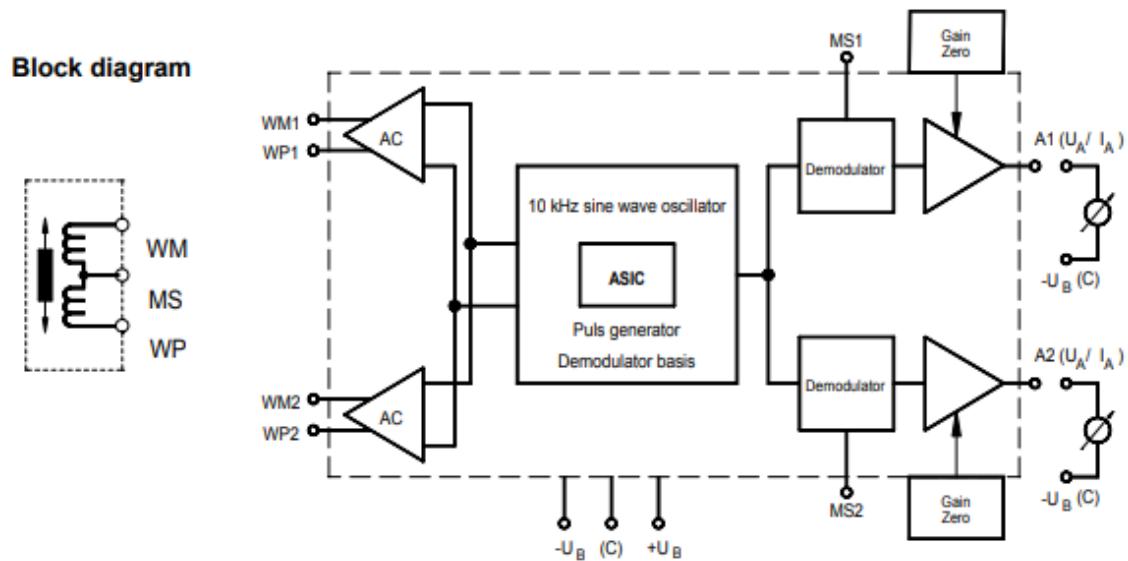


Figura 24. Diagrama de bloques módulo amplificador

Para la regulación básica de la señal de salida se selecciona mediante el ajuste de un jumper un factor de amplificación de dicha señal de 1x, 2x, 3.9x y 4.9x veces. Junto con el uso de un potenciómetro de 10K Ω integrado en la placa se puede ajustar de una manera más exacta la ganancia entre distintos rangos según el circuito de acondicionamiento seleccionado:

Typ	gain
SM121	2,4 .. 7,6 mA/V
SM123	1,9 .. 6,0 mA/V
SM125	2,3 .. 7,5 V/V
SM127	1,2 .. 3,8 V/V

Figura 25. Ajuste de ganancias LVDT

Entre los distintos módulos específicos, el fabricante facilita que la transmisión de la señal de salida sea bien en bucle de corriente de 4-20mA o bien sea en bucle de tensión continua de 0 a 10Vdc, dado que la distancia del módulo al procesador es muy próxima, de pocos centímetros, obviando por tanto el efecto resistivo de los cables, se opta por la utilización de una telemida en tensión con el modelo SM127.

7.5.2 Fuerza

En el caso de la medición de la fuerza aplicada sobre el terreno el sensor utilizado es la célula de carga del fabricante *DPF sensors* con un rango de medida de hasta cincuenta toneladas y con conexión remota a 4 hilos. Una célula de carga es un transductor diseñado ad hoc para la medida de fuerzas. Consiste en un soporte con galgas extensiométricas montadas sobre un puente completo de Wheatstone, siendo el soporte fabricado normalmente con aleaciones de acero.



Figura 26. Célula de carga

7.5.2.1 Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas son transductores de fuerza basadas en la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando se somete a un esfuerzo mecánico (efecto piezorresistivo), considerando que el valor de resistencia, desde la perspectiva física se define como:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Ecuación 14. Ecuación de resistencia

Siendo ρ el valor de la resistividad, l de longitud y S de sección y sometiendo a un esfuerzo de dirección longitudinal, cada una de las magnitudes experimenta un cambio, variando R de la siguiente manera:

$$\frac{dR}{dF} = \frac{d}{dF} \left(\rho \frac{l}{S} \right) ==> \frac{1}{R} \frac{dR}{dF} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dF} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dF} - \frac{1}{S} \frac{dS}{dF}$$

Ecuación 15. Variación de la resistencia respecto la fuerza



Multiplicando por dF en ambos lados de la ecuación el resultado obtenido es:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

Ecuación 16. Variación de la resistencia respecto a la fuerza (cont.)

Donde debido a la aplicación de fuerza, la variación de la resistividad se debe al efecto piezorresistivo, en el caso de la longitud es debido a la ley Hooke⁵ y finalmente la variación de la sección por la ley Poisson⁷. Para un material con las mismas propiedades físicas en cualquier dirección (isótropo) se obtiene que:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)] = GF \frac{dl}{l}$$

Ecuación 17. Variación de la resistencia respecto a la fuerza (cont.)

Donde μ es el coeficiente de Poisson que se encuentra en el margen entre 0 y 0.5 y C es la constante de Bridgman cuyo valor poder variar entre 1.13 y 1.15 para las aleaciones empleadas normalmente en galgas, hasta 4.4 para el platino o incluso 100 en caso de semiconductores. Para pequeñas variaciones de longitud la resistencia del conductor o semiconductor puede definirse de la forma:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = GF\varepsilon \implies R = R_0(1 + GF\varepsilon)$$

Ecuación 18. Resistencia de una galga extensiométrica

Donde GF es el factor de galga (o factor de sensibilidad), R_0 el valor nominal de la resistencia y ε la deformación longitudinal. Esta relación permite que a partir de la medida de los cambios de resistencia se puedan conocer los esfuerzos aplicados.

7.5.2.2 Puente completo de Wheatstone

Para la medida de los cambios producidos por las galgas extensiométricas se utiliza la configuración conocida como puente de Wheatstone, se trata de un circuito formado por cuatro resistencias, pasivas o variables, al cual se conecta la fuente de alimentación en una de sus diagonales mientras que en la otra se obtiene una tensión dependiente del valor de las resistencias. Al estar formando dos divisores de tensión en paralelo, la diferencia de potencial determina la señal de salida del puente

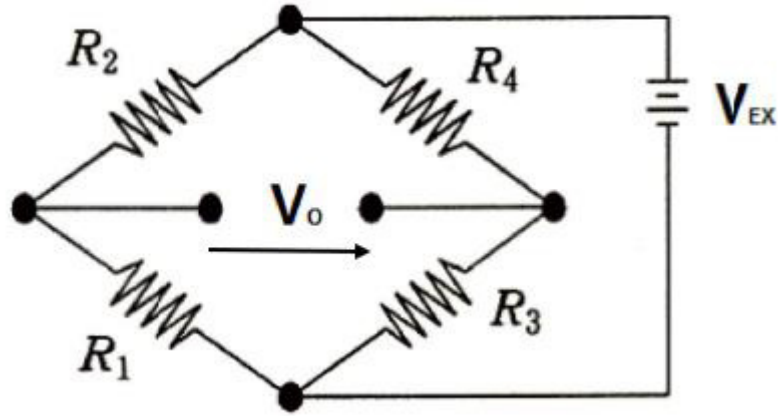


Figura 27. Puente de Wheatstone

$$V_o = V_{ex} \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right]$$

Ecuación 19. Tensión de salida del puente

Si $R_1 R_4 = R_2 R_3$ la tensión de salida V_o será nula, cumpliendo la condición de equilibrio del puente, por tanto, cualquier variación del valor de las resistencias dará lugar a una tensión distinta de cero. Dado que las galgas extensiométricas varían el valor de su resistencia a causa de la deformación, sustituyendo una o varias resistencias pasivas por galgas y someterlas a dicha deformación causaran una variación de la tensión de salida del puente.

Para llegar a obtener la máxima sensibilidad en la medida, se sustituyen las cuatro resistencias por galgas activas del mismo valor de resistencia nominal, para que el puente cumpla la condición de equilibrio inicial. La salida del puente, para una carga dada es el doble de la del puente con dos galgas activas y cuatro veces la del puente con un sola galga, por lo que en caso de que las cuatro detectasen, en valor absoluto, la misma deformación la señal de salida del puente será lineal y de valor:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = GF\varepsilon$$

Ecuación 20. Ecuación de puente completo con galgas activas



7.5.3 Presión

Se define la presión como la fuerza que ejerce por unidad de superficie un fluido sobre un área, esta se mide comparándola con una presión de referencia. Una referencia utilizada es el conocido como cero absoluto (vacío perfecto) en cuyo caso la medida se denomina presión absoluta. Otra clase de presión es la denominada presión manométrica, que utiliza la presión ambiente como referencia y una tercera alternativa consiste en conectar la puerta de referencia a una segunda presión conocida, denominándose este tipo de medida presión diferencial. Las unidades en las que se expresa tienen las siguientes equivalencias:

	Psi	Atmosferas	Milibar	kPa
Psi	1	0.068	68.948	6.8948
Atmósferas	14.7	1	1013.1	0.0101
Milibar	0.01450	9.87e-4	1	0.1
kPa	0.14504	0.0987	10	1

Tabla 5. Equivalencia entre unidades de presión

Los dispositivos de deflexión para medir la deformación y de esta manera captar la presión pueden ser diafragmas, fuelles o tubos. Al aplicar presión a un elemento elástico, este se deforma hasta que las presiones internas se igualan a la presión aplicada. Según el tipo de material y la geometría del sensor empleado, la deformación resultante puede ser más o menos amplia y puede ser medida mediante el uso de galgas extensiométricas, LVDT, potenciómetros o condensadores. La definición de estos sensores son las siguientes:

- **Diafragma:** se trata de una placa circular, delgada y flexible formada por una membrana tensa o una lámina sujeta en su perímetro que se deforma debido a una presión. Para medir la presión se utiliza un transductor de desplazamiento o deformación para detectar el desplazamiento del centro del diafragma.
- **Membrana:** son diafragmas más ligeros fabricados de metal delgado, caucho, neopreno o plástico. Se accionan mediante un muelle que proporciona la elasticidad necesaria. Se utilizan frecuentemente como diafragmas de aislamiento para evitar la incompatibilidad con fluidos corrosivos que pudieran entrar en contacto con el sensor.



- Fuelles: son cámaras selladas flexibles que realiza un desplazamiento horizontal (axial) de manera proporcional a la presión interior. Otro tipo de cámara utilizado son las cápsulas aneroides que consisten en dos diafragmas ondulados con la curvatura en oposición unidos por el borde y situados en caras opuestas de la misma cámara.

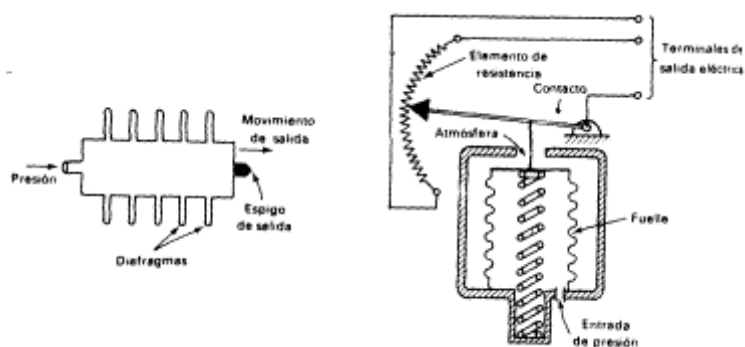


Figura 28. Fuelles

- Tubos Bourdon: desarrollado por Eugène Bourdon en 1849, consiste en un tubo hueco metálico en forma de arco de círculo, de hélice, de espiral o trenzado cerrado por un extremo. La deformación se produce al aplicar presión al extremo abierto del tubo haciendo que el tubo se enderece. Es más utilizado como detector de presión ya que son los que presentan más sensibilidad, aunque son también sensibles a vibraciones lo que puede llegar a eliminarse introduciéndolos en aceite de silicona, que los amortigua de manera considerada.

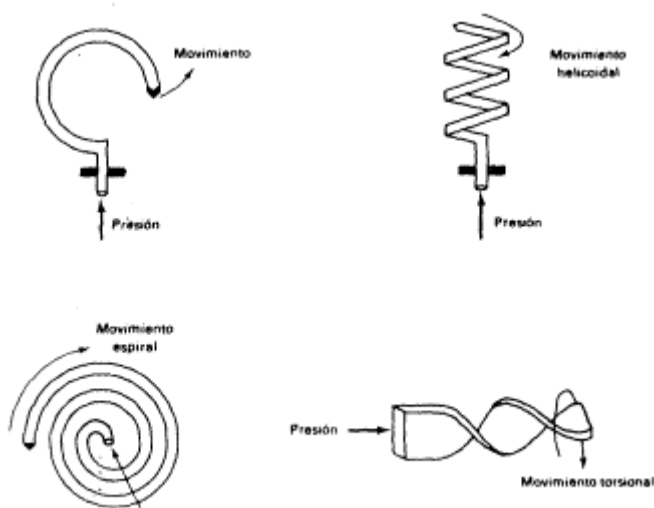


Figura 29. Tubos de Bourdon



7.5.3.1 Tipos de transductores de presión

7.5.3.1.1 Transductores de presión con galgas extensiométricas

Este tipo de transductor utiliza un diafragma que se flexiona debido a la presión y 2 o 4 galgas extensiométricas para medir esa deformación. Los diafragmas pueden ser de acero o silicio cuya sensibilidad es de unas 100 veces mayor.

Estos transductores convierten los cambios de presión en cambios de resistencia debido a la deformación de las galgas en un puente de Wheatstone, de manera de obtener una señal eléctrica proporcional a la presión. La mitad de las galgas utilizadas se comprimen mientras que la otra mitad se extienden, tal como se refleja en la siguiente figura:

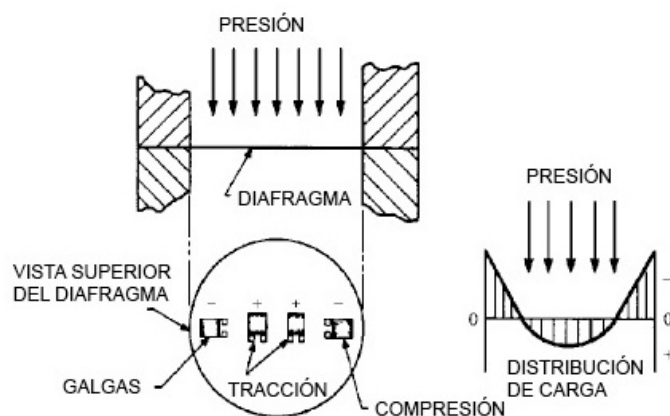


Figura 30. Transductores de presión con galgas extensiométricas.

Además del diafragma, también se utilizan cilindros huecos de manera de poder llegar a medir presiones muy altas del orden de 210MPa hasta incluso 700Mpa, en este caso se denominan células de presión.

7.5.3.1.2 Transductor de presión potenciométrico

El transductor de presión potenciométrico consiste en el uso de un sensor de presión, como el tubo de Bourdon o las cápsulas, de manera que el extremo cerrado está unido al cursor de un potenciómetro como en la siguiente figura:

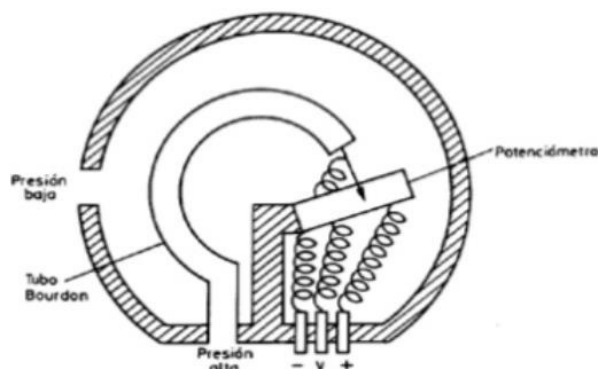


Figura 31. Transductor de presión potenciométrico

Los transductores de alta presión tienen fuerza suficiente para girar el cursor de un potenciómetro, conectando este a un tubo de Bourdon de forma helicoidal, puede llegar a generar suficiente movimiento como para poder mover el cursor en todo su rango y de esta forma convertir la presión en una tensión de salida. Para transductores de baja presión se utilizan capsulas simples o múltiples

7.5.3.1.3 Transductores de presión inductivos

En este tipo de transductor se combina un sensor de presión con un transductor de desplazamiento inductivo como el LVDT. En este caso, el desplazamiento de un tubo Bourdon o una cápsula es la que causa el desplazamiento del núcleo ferromagnético del sensor cambiando por tanto la posición respecto los devanados y como consecuencia la señal de salida.

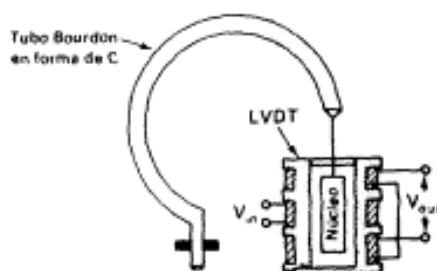


Figura 32. Transductor de presión inductivo

7.5.3.1.4 Transductores de presión capacitivos

En esta ocasión el diafragma es una placa de un condensador. El cambio de posición de dicha placa como consecuencia de la presión produce una variación en el valor de la capacidad del condensador debido a la variación de su geometría ya que el valor de la capacidad de un condensador plano e isótropo es:



$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

Donde:

- ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico utilizado.
- ϵ_0 : permitividad del vacío: 8.8542×10^{-12} F/m
- S: superficie enfrentada de las placas.
- d: distancia entre las placas.

Utilizando como acondicionador de señal un puente en alterna o un oscilador con convertidor F/V se obtiene una señal de salida, de manera proporcional a la presión aplicada, que es preciso amplificarla debido al orden tan bajo de señal de señal que se obtiene.

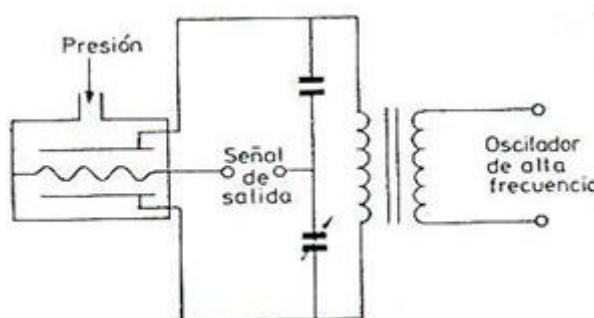


Figura 33. Transductor de presión capacitivo

7.5.3.1.5 Transductores de presión piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico consiste en la autogeneración de una señal eléctrica sin necesidad de ningún tipo de alimentación, sino que se genera al deformarse físicamente el material bajo un esfuerzo. Este efecto además es reversible, al aplicarse una diferencia de potencial entre las dos caras de este material causa una deformación de este. El material que más se utiliza es el cuarzo, debido a su alta linealidad y muy baja histéresis, o también la utilización de una mezcla de cristales cerámicos que adquieren este efecto debido a la exposición a un campo eléctrico durante un proceso de calentamiento y posterior enfriamiento del material.

Este tipo de transductores son esencialmente dieléctricos con alta permitividad y con una resistencia de pérdidas de baja conductividad, pudiendo modelarse como un condensador de placas paralelas.

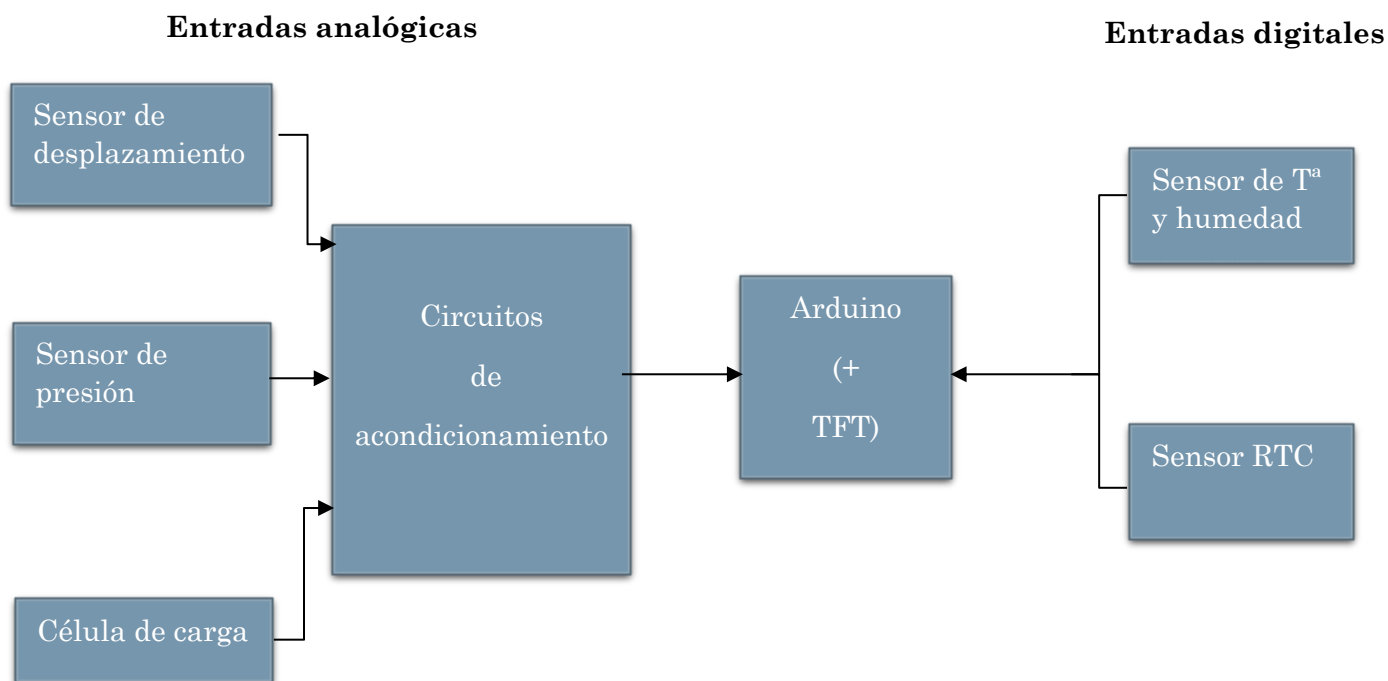


8 SISTEMA REGISTRADOR DESARROLLADO

Teniendo en cuenta el diagrama de bloques descrito en la figura 3, se procede a analizar los distintos componentes que forman el sistema de adquisición que conforma el *datalogger* desarrollado. El núcleo digital de dicho sistema está formado por el microcontrolador Arduino, encargado de gestionar las magnitudes medidas por los sensores, junto con la pantalla táctil TFT, con la que el usuario además de poder interpretar las medidas puede dar comienzo a la captura de datos mediante la conexión USB del Arduino con un PC si se requiere la posterior interpretación de estos.

Los distintos sensores que se van a utilizar para la realización de los ensayos anteriormente descritos precisan de una serie de circuitos de acondicionamiento para que las señales enviadas a las entradas analógicas del microcontrolador tengan una tensión adecuada conforme al SPAN del ADC para poder ser interpretadas. Por otra parte se desarrollará también el funcionamiento de los sensores digitales conectados directamente a las entradas pertinentes del microcontrolador.

A un nivel más externo se menciona la fuente de alimentación de todo el sistema, la cual también tendrá que ser adaptada para las distintas demandas de alimentación que requiere cada componente que conforma el *datalogger*. Un esquema generalizado de todo el conjunto sería el siguiente:



8.1 MICROCONTROLADOR: ARDUINO MEGA 2560 REV3

Para poder llevar a cabo la lectura e interpretación de las señales eléctricas enviadas por los sensores, estas serán procesadas por la tarjeta Arduino Mega 2560 Rev3 basado en el microcontrolador ATmega2560. Provisto de 54 pines digitales de entrada/salida, 16 pines de entrada analógica, 4 UARTs y un cristal oscilador de 16MHz.

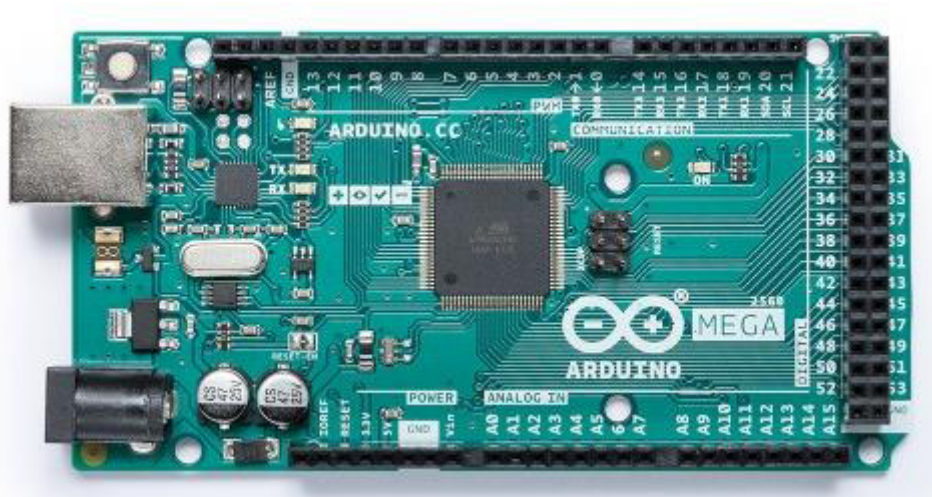


Figura 34. Arduino Mega 2560 Rev3.

El fabricante facilita las siguientes especificaciones en su datasheet⁹:

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Tensión de alimentación recomendada	7-12V
Tensión de alimentación límite	6-20V
Pines digitales E/S	54 (de los cuales 15 salida PWM)
Pines analógicos de entrada	16
Corriente continua por cada pin E/S	20 mA
Corriente continua para pin 3V3	50 mA
Memoria flash	256 Kb
SRAM	8 Kb
EEPROM	4 Kb
Velocidad del reloj	16 MHz

⁹ https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf



Para la conversión de las entradas analógicas, el ADC interno del Arduino Mega 2560 tiene una resolución de 10 bits, por tanto con una tensión de referencia máxima ideal de 5V (SPAN), el valor del escalón de cuantificación del ADC es de 4.88mV ($5V/2^{10}-1$).

El fabricante además indica que utilizando un oscilador de 16MHz, y teniendo un valor de *prescaler*¹⁰ de 128 (7 bits), resulta una frecuencia de reloj de ADC de 125kHz, encontrándose dentro de los límites de 50kHz y 200kHz requeridos.

El fabricante además también indica que, aunque el ADC este activo no se inicializa hasta el momento que realiza la primera petición de conversión. Para realizar una conversión normal se precisan de 13 ciclos de reloj del ADC lo que equivale a 104 μ s, mientras que la primera conversión conlleva 25 ciclos de reloj ADC tal como se muestra en la siguiente figura, lo cual equivale a 200 μ s.

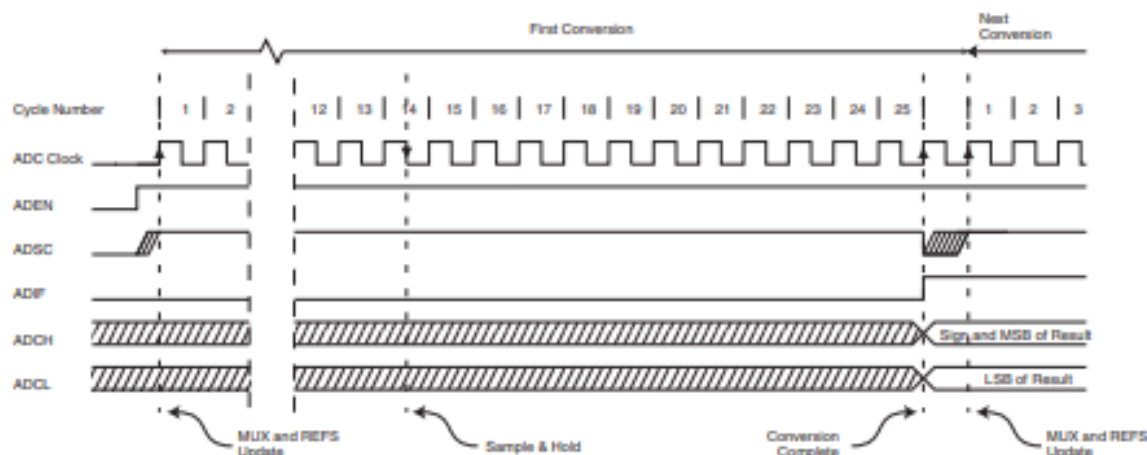


Figura 35. Diagrama de tiempo del ADC, donde se muestra la primera conversión.

8.1.1 Pantalla TFT 3.5"

Una vez que el microcontrolador interprete la señal eléctrica recibida por el sensor y con el fin de dar a conocer el valor de la magnitud en tiempo real al usuario, se muestra la información por una pantalla TFT de 3.5 pulgadas de tamaño y una resolución de imagen de 320x480 píxeles.

¹⁰ Divisor de frecuencia programable



La comunicación con la pantalla TFT en la mayoría de los casos se realiza a través del bus SPI (*Serial Peripheral Interface*) debido al alto volumen de datos que requieren. El bus SPI tiene una arquitectura del tipo maestro-esclavo, en el que un dispositivo maestro (*master*) se comunica de manera bidireccional con uno o varios dispositivos esclavos (*slave*).

La comunicación de datos entre maestro y esclavo además es de tipo *Full Duplex*, es decir, que el dispositivo maestro tiene la capacidad de enviar y recibir datos de manera simultánea y además también síncrona, ya que junto con las líneas de comunicación, incluye una línea de reloj que mantiene a todos los dispositivos sincronizados.

En el tipo de pantalla TFT (*Thin Transistor Layer*) los subpíxeles se distribuyen en forma de matriz $m \times n$, de tal manera que se controlan encendiendo la fila y columna al cual corresponda. Para evitar las caídas de tensión que se puedan producir al alimentar varios píxeles consecutivos, estos disponen de un transistor en una delgada capa (Capa TFT en la figura), esta es la responsable del nombre con el que se conoce a esta tecnología.

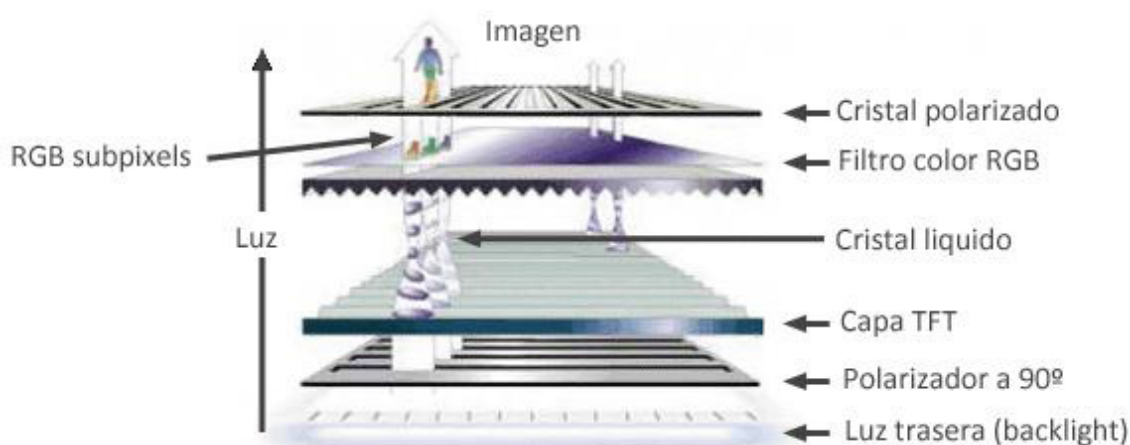


Figura 36. Pantalla TFT. Imagen procedente de <https://www.luisllamas.es/conectar-arduino-a-una-pantalla-tft/>

El controlador de la TFT adquirida para el sistema de adquisición es el ILI9486, se trata de un controlador SoC (*System on Chip*) cuya resolución es de 320RGBx480 puntos, y está constituido por un controlador fuente de 960 canales, un controlador de puerta de 480 canales, 345,600bytes GRAM y circuito de alimentación.



8.2 CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO Y CALIBRACIÓN DE LAS SEÑALES ANALÓGICAS

Para obtener un ajuste óptimo entre las señales recibidas desde los distintos sensores utilizados y el valor de referencia máximo que establece el microcontrolador de 5V, es necesario acondicionar dichas señales. Es preciso realizar una adaptación de tal forma de obtener un valor de tensión comprendido entre 0 y 5V proporcional a la variable a medir, pero según el tipo de sensor utilizado la transmisión puede ser en corriente o con una tensión superior, pero primero conviene definir que son este tipo de transmisiones antes de elegir el circuito de acondicionamiento que precisa cada sensor.

8.2.1 Transmisión en bucle de tensión

La transmisión mediante un bucle de tensión (*Voltage loop*) consiste en convertir la señal eléctrica de salida del transductor en una tensión proporcional a la magnitud medida y transmitir la información hasta el extremo receptor. En el circuito de salida del emisor del bucle se debe trabajar con una impedancia de muy bajo valor para conseguir la máxima amplificación posible de tensión, mientras que en el receptor la impedancia de entrada tenderá a ser elevada, con el fin de conseguir que la atenuación de la señal resulte casi inexistente.

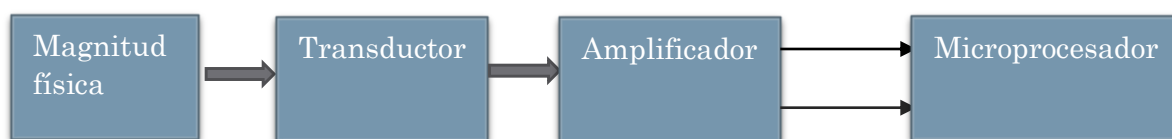


Figura 37. Sistema de telemetría por tensión

Se suelen establecer los siguientes valores normalizados de bucle de tensión:

- 0 a 5 V
- 0 a 10 V
- 0 a 24 V
- Doble polaridad: -2.5/+2.5, -5/+5, -10/+10 V

8.2.2 Transmisión en bucle de corriente

La transmisión de la señal de salida mediante un bucle de corriente (*Current loop*), consiste en convertir la señal de salida en una corriente continua de manera proporcional a la magnitud medida.

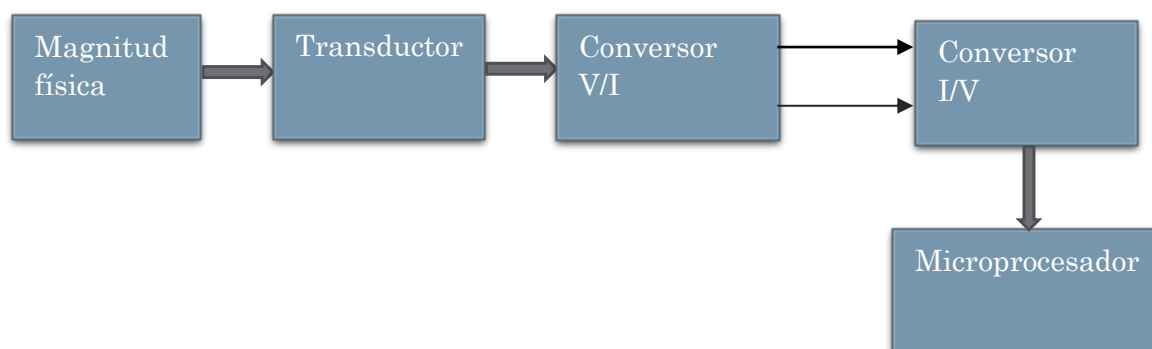


Figura 38. Sistema de telemedida por corriente

Los rangos de corriente a transmitir están normalizados, siendo el más utilizado el rango comprendido entre 4 y 20 mA, que cuenta como ventaja que permite distinguir el nivel cero respecto el circuito abierto. Los demás valores normalizados a destacar son:

- 0 a 5 mA
- 0 a 20 mA
- 10 a 50 mA
- 2 a 10 mA

Las ventajas de este tipo de transmisión respecto al bucle de tensión principalmente son que la caída de tensión debido a la resistencia que presenta el cableado no afecta a la transmisión de la señal y además se evita la interferencia producida por la inducción de tensiones parásitas.

8.2.3 Sensor de desplazamiento

El fabricante *Schreiber Messtechnik*, tal como se puede ver en los anexos, proporciona los siguientes datos técnicos del sensor de desplazamiento SM260.24.2:

Datos técnicos:

(para operar con nuestros amplificadores)	
Linealidad	<0,5% ó 0,25%
Desviación del cero fun. temp.	< 0,01% / °C
Rango de temp. con conector	-40 °C hasta + 85 °C
Rango de temp. con cable	-40 °C hasta + 100 °C
Resistencia al choque	250 g SRS 20....2000 Hz
Resistencia a las vibraciones	20 g rms (puntas de 50 g)
Grado de protección	hasta IP 68*

Tabla 6. Datos técnicos sensor SM260.24.2



Dicho fabricante destaca que los errores que puede presentar el sensor son en la linealidad causando que, aunque la variación sea mínima, la función de respuesta no sea una línea totalmente recta además de un error de desfase del punto cero causado por la variación de la temperatura. Dada su gran linealidad demostrada hace que este sensor sea idóneo para los ensayos geotécnicos desarrollados a pesar no haberse realizados pruebas de la deriva térmica que pudiera afectar al resultado de la medida.

El circuito de acondicionamiento modelo SM127 (cuyos fundamentos han sido explicados en la sección 7.5.1 de este documento) viene provisto de un potenciómetro de 10K Ω para el ajuste del punto cero. Para ajustar dicho punto, el fabricante indica que la señal de salida del circuito sin conectar el transductor debe ser de 5.0V, si se mide valor distinto debe realizarse el ajuste mediante el potenciómetro N1. Los datos técnicos que facilita sobre el circuito SM127 son:

Datos técnicos:

Frecuencia del oscilador	10 KHz nominal
Voltaje del oscilador	13,6 V _{pp} Senoidal
Punto cero	regulable en $\pm 10 \%$
Amplificación	regulable, con jumpers y potenc.
Frecuencia límite	800 Hz
Variación con la temperatura	< 0,005% / °C
Temperatura de trabajo	-20 °C .. +85 °C

Tabla 7. Datos técnicos circuito impreso SM127

Dichos valores el fabricante indica que son válidos a una temperatura de 20°C y con una tensión de alimentación de 24 Vcc. El error máximo causado por la variación con la temperatura viene determinado por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_T = \frac{1}{S} * CT(\%) * \Delta T * V_{outmax}$$

Ecuación 21. Error causado por la variación de temperatura

Siendo S el valor de la sensibilidad, es decir, la relación entre la señal de entrada (desplazamiento) y de salida (tensión) del circuito; CT(%) el coeficiente de temperatura relativo del circuito que asumimos constante en todo el rango de trabajo. La temperatura máxima que puede alcanzar es de 85°C por lo que la variación desde la temperatura de calibración es de $\Delta T=65^\circ\text{C}$. Para un valor máximo de salida del bucle de 10V la tensión de error alcanzara un valor de:

$$\Delta V_T = \frac{24}{10} \text{ mm/V} * 0.005 \% / ^\circ\text{C} * 65^\circ\text{C} * 10\text{V} = 0.078 \text{ mm}$$

Ecuación 22. Cálculo de la tensión de error de temperatura

Error que se puede estimar como asumible para el tipo de ensayos que se van a realizar. Por lo que no precisaría una compensación de temperatura.



Figura 39. Circuito acondicionador SM127

Para el ajuste de ganancia del transductor el fabricante indica que mecánicamente se lleve el núcleo ferromagnético a la posición neutral, esto es, en la que tras el ajuste del punto cero alcanza los 5.0V y desde esa posición regular un cuarto del recorrido de la medición total, en caso del desplazamiento máximo a configurar de 24mm se debe recorrer 6mm. Este ajuste se realiza mediante la utilización de un calibre de precisión. Con el potenciómetro V1 se ajusta al valor final de 7.5V o 2.5V según la dirección de desplazamiento del núcleo.

La señal provista del sensor LVDT tiene una sensibilidad de 175mV por cada milímetro de desplazamiento del núcleo ferromagnético, pero mediante el circuito acondicionador se provee una señal de salida en bucle de tensión de 0 a 10V. Dado que la tensión máxima de SPAN del microcontrolador es de 5V es preciso reacondicionar nuevamente la señal para realizar el ajuste óptimo.

Se opta para tal ajuste por la utilización del módulo comercial FZ0430. Dicho circuito es un divisor de tensión provisto de dos resistencias SMD de 30 k Ω y de 7.5k Ω , por lo que la tensión percibida tras el módulo es:

$$V_{out} = \frac{V_{in} * 7.5}{7.5 + 30} = \frac{V_{in}}{5}$$

Ecuación 23. Divisor de tensión

Puesto que la tensión máxima del bucle es de 10V (V_{in} en la ecuación anterior) y la señal de salida máxima del módulo es de 2V (V_{out}), se reduce en gran parte el rango dinámico de la tensión del bucle, con el propósito de obtener un ajuste óptimo respecto al rango impuesto por el ADC, se sustituye la resistencia de 30k Ω por otra de 7.5 k Ω de manera que la tensión de salida máxima del módulo sea de 5V y así obtener la mayor resolución posible de la señal medida por el sensor.



Figura 40. Módulo FZ0430



8.2.4 Célula de carga

La célula escogida DPF-BPSE permite realizar ensayos no solo de compresión sino también de tracción, y aunque tal como se desarrolló en el apartado correspondiente¹¹ solo adquieren cierta importancia en estudios de rocas, si hace que esta célula destaque además de por el alto rango de carga soportado de 50 toneladas. Los datos técnicos que facilita el fabricante sobre la célula de carga son los siguientes:

Especificaciones Técnicas/Technical Characteristic	
Sensibilidad /Sensibility	2(mV/V) \pm 0,5%
Tensión de excitación <i>Bridge excitation voltage</i>	5..24V(max.35V)
Tolerancia de ajuste del cero <i>Tolerance adjust on zero</i>	<0,25% F.Escala
No linealidad /Non linearity	<0.015 % F.E.
No repetibilidad /Non repeatability	<0.015 % F.E.
Error combinado / Combined error	<0.03 % F.E.
Histéresis /Hysteresis	<0.02 % F.E.
Fluencia en 30 minutos /Creep in 30 min	<0.016 % F.E.
Fluencia en 4 horas /Creep in 4 hours	<0.05 % F.E.
Efecto de la temp. sobre la sensibilidad /	
<i>Temp. effect on sensibility</i>	< \pm 0.0015 % / °C
Efecto de la temp. sobre la señal de cero /	
<i>Temp. effect on zero</i>	< \pm 0.0023 % / °C
Margen de temp. compensado /	
<i>Compensated margin of temp.</i>	-10° y +40 °C

Tabla 8. Datos técnicos de la célula de carga

Cuando el transductor se encuentra en el lugar de medida y el resto del puente alejado de él, debido a la presencia de hilos de conexión largos causa una resistencia añadida en serie con el transductor, siendo preciso utilizar una conexión a cuatro hilos que consiste en la utilización de un par de cables para la conexión con la fuente de alimentación y otro par distinto para la medida. De tal modo, las caídas de tensión producidas en contactos y en los propios cables no serán medidas por el dispositivo. Por consiguiente, la señal de salida de la célula de carga, referida a la tensión de alimentación, la cual el fabricante indica que es de 2mV/V siendo esta el voltaje de salida diferencial del puente producido por cada voltio de excitación de la fuente de alimentación (V_o/V_{ex}), proporcionando como resultado que la sensibilidad y tensión de salida sigan las siguientes ecuaciones:

¹¹ Véase apartado 7.4



$$S = \frac{2 \text{ mV}/V * V_{cc}}{FS}$$

Ecuación 24. Sensibilidad de la célula de carga

$$V_{out} = \text{Sensibilidad} \left[\frac{V}{Ud \text{ carga}} \right] \times \text{carga}$$

Ecuación 25. Tensión de salida de la célula de carga

Las galgas extensiométricas que componen la célula se fabrican autocompensadas en temperatura, es decir que las resistencias mantienen un coeficiente de temperatura negativo de manera de poder contrarrestar el coeficiente de dilatación de igual módulo pero con signo positivo, esta compensación se encuentra limitada dentro de los márgenes de temperatura de actuación indicados.

La señal proveniente de la célula de carga con una tensión de alimentación máxima permitida de 24V da como resultado que la sensibilidad del sensor adquiera el valor de:

$$S = \frac{2 \text{ mV}/V * 24V}{50 T} = 960 \text{ } \mu\text{V}/T$$

Ecuación 26. Sensibilidad máxima de la célula de carga

Con una carga de una tonelada, el valor de salida es de 960 μ V siendo de un orden muy inferior al de cuantificación del ADC del microcontrolador que es del orden de mV. Haciendo necesario adaptar la señal mediante la utilización de un amplificador de instrumentación (AI) para poder obtener el bucle de tensión de 0 a 5V requerido.

El amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial compuesto por dos entradas y una señal de salida igual a la ganancia del amplificador, G, multiplicada por la diferencia de las dos señales de entrada. Dicha ganancia, además de ser precisa y estable, está comprendida en un rango de amplificación muy amplio (generalmente entre 1 y 1000 veces), realizando el ajuste mediante el uso de un potenciómetro o en ocasiones mediante la utilización de conmutadores (ya sean JFET o MOSFET).

El amplificador de instrumentación escogido para tal función es el modelo INA114BP¹² de *Texas Instrument*, dispositivo que provee una gran precisión con un bajo consumo de energía. Cuyo esquema se puede ver en la siguiente figura:

¹² <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>

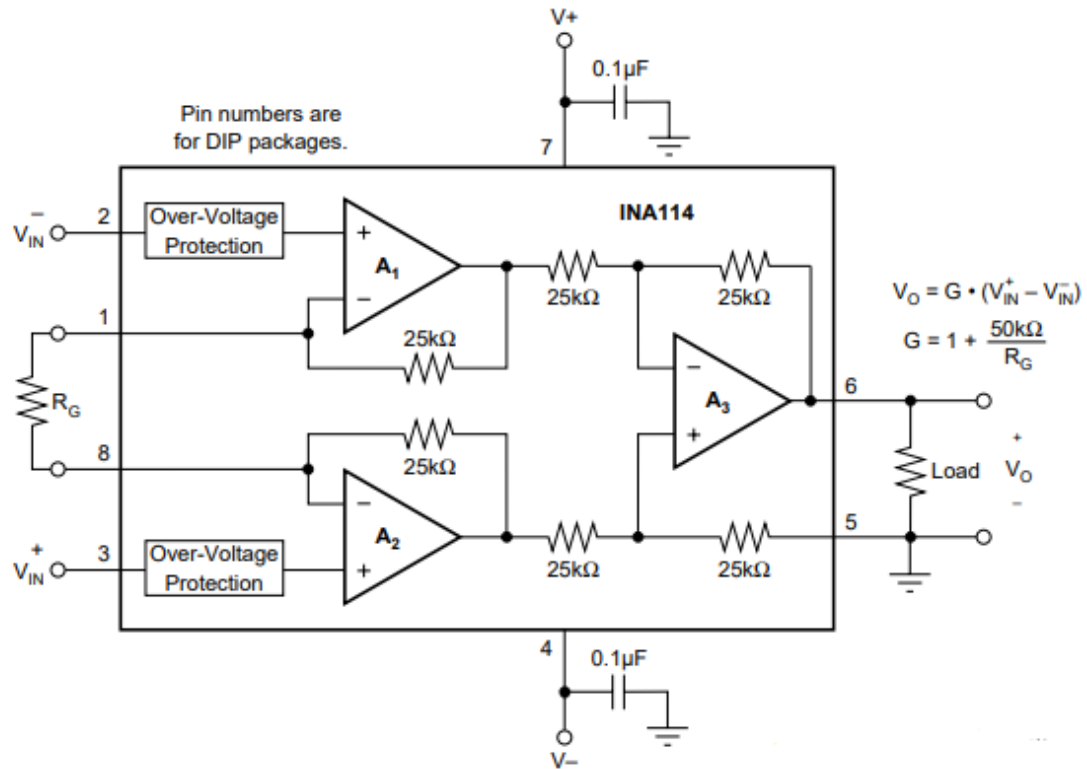


Figura 41. Dispositivo INA114BP

Realizando un estudio de la etapa de entrada al amplificador se puede determinar que las ganancias son:

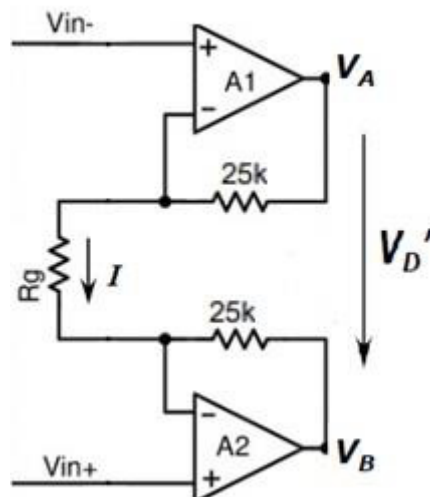


Figura 42. Etapa de entrada INA114



Ganancia diferencial:

$$V_{dif'} = V_B - V_A = -I(25k + 25k + R_G)$$

$$I = \frac{V_{in+} - V_{in-}}{R_G} = \frac{V_{dif}}{R_G}$$

$$V_{dif'} = \frac{25k+25k+R_G}{R_G} V_{dif} \rightarrow A_d = \frac{V_{dif'}}{V_{dif}} = \frac{50k+R_G}{R_G}$$

Ganancia común:

$$V_A = I \times 25k + V_{cm} - \frac{V_{dif}}{2}$$

$$V_B = -I \times 25k + V_{cm} + \frac{V_{dif}}{2}$$

$$V_{cm'} = \frac{V_A + V_B}{2} = V_{cm} + \frac{25k - 25k}{2R_G} V_{dif} = V_{cm}$$

$$A_{cm} = \frac{V_{cm'}}{V_{cm}} = 1$$

Mientras que en la etapa de salida del INA114 al cumplirse que las cuatro resistencias son idénticas, las ganancias del circuito son:

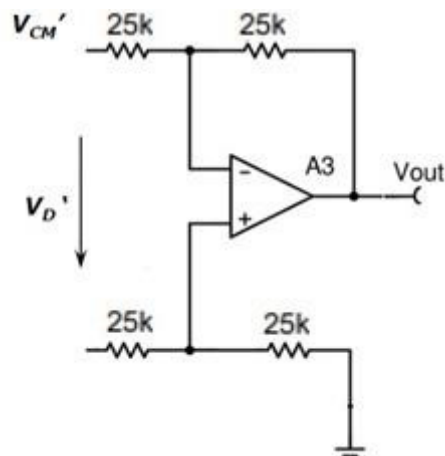


Figura 43. Etapa de salida INA114

Ganancia diferencial:

$$A_{d2} = \frac{25k}{25k} = 1$$

$$V_{out(d)} = A_{d2} V_{dif'}$$

Ganancia común:

$$A_{cm2} = 0$$

$$V_{out(cm)} = A_{cm2} V_{cm'} = 0$$



Simplificando la ecuación resultante la tensión de salida del amplificador:

$$V_{out} = \frac{25k}{25k} \left(\frac{50k}{R_G} + 1 \right) V_{dif} = \left(\frac{50k}{R_G} + 1 \right) V_{dif}$$

Ecuación 27. Tensión de salida del amplificador INA114

Al tratarse de un amplificador con ganancia diferente a la unidad, en la hoja de características los errores vienen formulados con referencia a la entrada (R.T.I) permitiendo su comparación directa con la magnitud de la señal proveniente de la célula de carga. En caso de querer referenciarlo respecto la señal de salida (R.T.O) al ser más fácil experimentalmente de medir por su magnitud, sigue la siguiente relación:

$$Error RTI = \frac{Error RTO}{G}$$

Las características de la ganancia del amplificador de instrumentación que el fabricante son las siguientes:

GAIN								
Gain Equation		1	$1 + (50k\Omega/R_G)$	10000	*	*	*	V/V
Range of Gain								V/V
Gain Error	G = 1		±0.01	±0.05	*	*	*	%
	G = 10		±0.02	±0.4	*	*	±0.5	%
	G = 100		±0.05	±0.5	*	*	±0.7	%
	G = 1000		±0.5	±1	*	*	±2	%
	G = 1		±2	±10	*	*	±10	%
Gain vs Temperature								ppm/°C
50kΩ Resistance ⁽¹⁾								ppm/°C
Nonlinearity	G = 1		±0.0001	±0.001	*	*	±0.002	% of FSR
	G = 10		±0.0005	±0.002	*	*	±0.004	% of FSR
	G = 100		±0.0005	±0.002	*	*	±0.004	% of FSR
	G = 1000		±0.002	±0.01	*	*	±0.02	% of FSR

Tabla 9. Ganancia INA114

El error de ganancia indicado define el error supuesto que la resistencia R_G de la ecuación de ganancia fuera totalmente precisa, es decir, que la variación en su tolerancia fuera nula. El error debido a la deriva térmica puede ser compensada si se trabaja dentro del rango de temperaturas establecidas.

Al tratarse de un amplificador de instrumentación uno de los requisitos es que el CMRR debe ser muy alto, dado que la ganancia diferencial como se ha visto anteriormente debe ser mucho mayor que la común. Para este dispositivo se indica que, para una ganancia de 1000, el valor del CMRR es de 115dB. Otros requisitos son que alcance la máxima linealidad en la ganancia programable o que la aportación de ruido que pueda contribuir sea mínima. En este caso el fabricante indica que en este amplificador el valor de su densidad de ruido no llega a superar los $15nV/\sqrt{Hz}$ tal como se refleja en la siguiente tabla:

NOISE VOLTAGE, RTI	G = 1000, $R_S = 0\Omega$						
f = 10Hz			15			*	nV/√Hz
f = 100Hz			11			*	nV/√Hz
f = 1kHz			11			*	nV/√Hz
$f_B = 0.1Hz$ to 10Hz			0.4			*	μVp-p
Noise Current							
f=10Hz			0.4			*	pA/√Hz
f=1kHz			0.2			*	pA/√Hz
$f_B = 0.1Hz$ to 10Hz			18			*	pAp-p

Tabla 10. Tensión de ruido referido a la entrada del INA114



Entre las especificaciones técnicas del circuito hay que reseñar que el rango de amplificación es de 1 y 1000 veces. Para una carga máxima de 50T la señal de salida del sensor con una excitación máxima de 24V da como resultado:

$$V_{out} = \frac{2 \text{ mV/V} * 24V}{50 T} * 50T = 48mV$$

Ecuación 28. Tensión de salida máxima de la célula de carga

Para un tope máximo de tensión de entrada al ADC de 5V, la ganancia mínima que se precisa ajustar es de $5 / 0.048 = 104.16$ valor que se encuentra dentro del rango de amplificación posible del dispositivo. Para unificar la alimentación de la célula con la del resto de sensores se procede a ajustar la tensión de alimentación a 21V¹³ con los que la tensión de salida máxima haciendo uso de la ecuación anterior pasa a ser de 42mV y la ganancia requerida de 119.05. Despejando la ecuación de ganancia para dicho valor el valor resultante de R_G es de $423,5\Omega$, resistencia que se puede conseguir aproximadamente con los valores comerciales de 390 y 33Ω .

8.2.5 Sensor de presión

El transmisor de presión E13-VF está compuesto por un elemento sensor piezorresistivo¹⁴ con membrana de acero y un transductor con salida en bucle de corriente 4-20mA, de manera que la resistencia que pueda presentar el cableado situado desde el sensor al procesador de la señal no afecte a la medida realizada.



Figura 44. Sensor de presión e13-vf

Para poder interpretar la señal recibida por el transductor de presión, tal como se describe en el sistema desarrollado en la sección de *Transmisión en corriente*, se requiere el uso de un convertidor I/V de manera que el bucle de corriente de 4-20mA recibido se pueda convertir en uno de tensión con salida de entre 0 y 5V, de manera que el ADC pueda interpretar la señal eléctrica recibida. Para realizar dicha conversión esta se llevará a cabo mediante el uso del receptor RCV420¹⁵ de *Texas Instrument*.

¹³ Véase apartado *Fuente de alimentación*

¹⁴ Véase apartado 7.2.1 *Galgas extensiométricas*

¹⁵ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/rcv420.pdf>



El dispositivo está compuesto por un amplificador operacional, una red de resistencias y una referencia de precisión de 10V dispuesto según la siguiente figura:

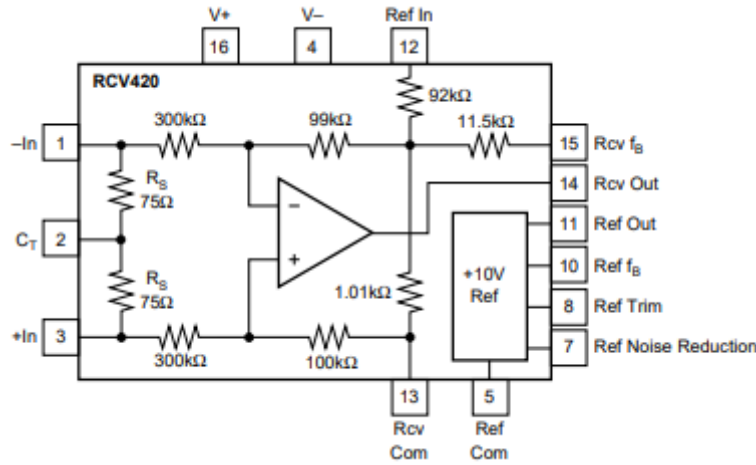


Figura 45. RCV420

Para una salida de 0-5V con una entrada de 4-20mA la impedancia de transferencia requerida del circuito se obtiene:

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{5V}{16mA} = 0.3125 \text{ V/mA}$$

Ecuación 29. Transimpedancia RCV420

Pero para lograr la señal requerida (0V para 4mA y 5V para 20mA) el fabricante indica que la salida del amplificador debe ser desplazada un valor de:

$$V_{os} = -(4mA)(0.3125 \text{ V/mA}) = -1.25V$$

Ecuación 30. Voltaje de compensación

Para poder conseguir dicha compensación de -1.25V se utilizan la red en T de resistencias de realimentación del amplificador junto con la referencia de tensión. Las resistencias de entrada R_S denominadas *sensoras*, son las que realizan la conversión I/V de manera que la tensión de entrada al operacional V_{IN} sea proporcional a la corriente de entrada, siendo $V_{IN} = 75\Omega \cdot I_{IN}$. Esta tensión será amplificada para alcanzar el rango 0-5V. Las resistencias de entrada de 300kΩ facilitan una alta impedancia de entrada y consiguen disminuir las tensiones en modo común, el conexionado básico del RCV420 se presenta en la siguiente figura:



The diagram shows a circuit for a 4-20mA input module. A 4-20mA current loop is connected to the input of an RCV420 IC. The circuit includes a precision op-amp (represented by a triangle) and a reference voltage source (10.0V Ref). The output of the module is connected to a 0 to 5V meter. The circuit is powered by a +28V supply (15V to 36V) and a -16V supply.

NOTE: (1) NC = No Connection.

61



En esta solución aportada por el fabricante indica que, en funcionamiento normal, la señal de bucle de corriente de 4-20 mA produciría una salida de 0-5V con el pin offset RCV420 (*Ref In*) conectado a la referencia de +10V. Dicha referencia de 10V proporciona un desplazamiento de -1.25 V para que la corriente de entrada de 4 mA produzca 0V en la salida. En esta aplicación, el pin *Ref In* está conectado a la señal de tierra de la alimentación, que actúa como una referencia de -10 V , produciendo los $+1.25\text{V}$ de compensación. Sin embargo, ahora con las entradas conectadas, produce una señal de salida invertida, es decir, la salida del RCV420 será de 0 a -5V referenciado a la pseudotierra. Dado que la pseudotierra es a 10 V, la salida real será de 10 V a 5 V.

Pero esta solución debido a la limitación de tensión de los pines de Arduino (para no destruir el oscilador no se pueden superar los 5.5V según indica su datasheet) no es válida. Por lo que se requiere una solución para la alimentación simétrica del RCV420.

Para conseguir la tensión negativa de alimentación primero se procede a configurar como oscilador a estable el *timer* NES555¹⁷ como el de la figura:

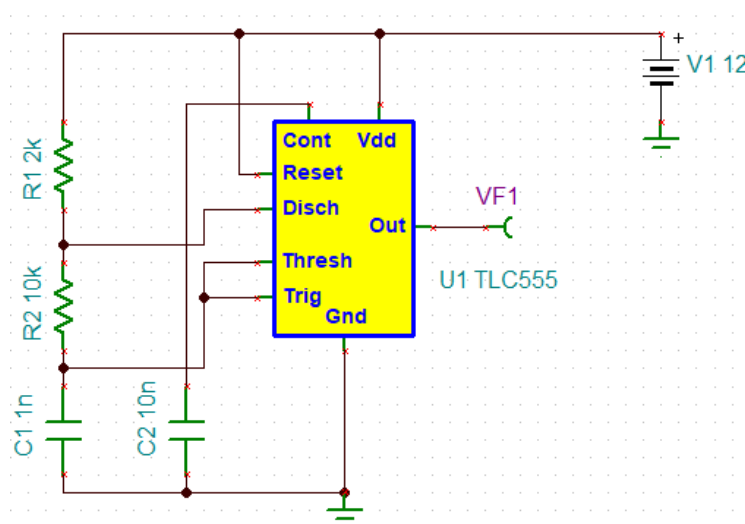


Figura 48. NES555 configurado como oscilador a estable

Tal configuración da como resultado una señal cuadrada como la mostrada en la siguiente simulación:

¹⁷ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>

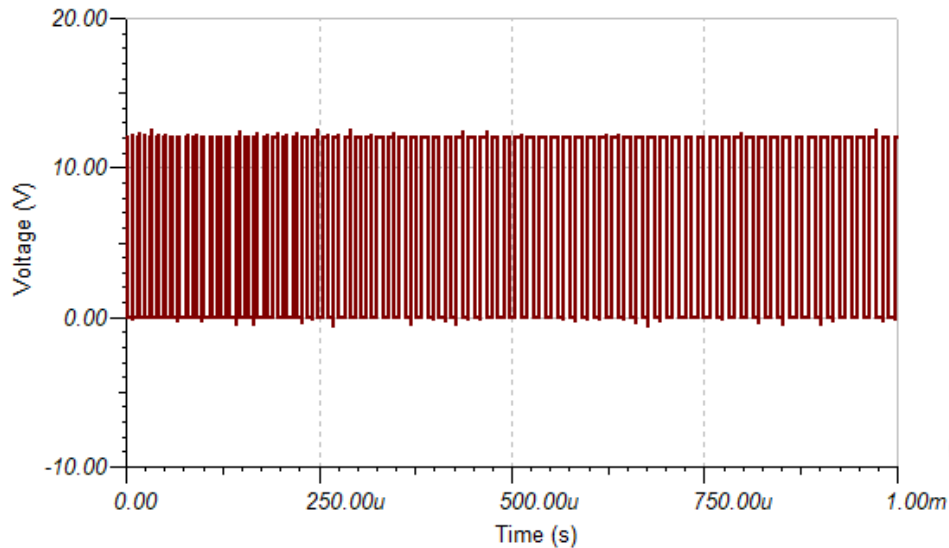


Figura 49. Tensión de salida del oscilador aestable

Realizando una modificación del circuito como el de la siguiente imagen, se obtiene que cuando la salida del *timer* este a nivel alto el condensador C3 se carga a través del diodo D1, mientras que el diodo D2 se encuentra polarizado en inverso y por tanto actúa como circuito abierto.

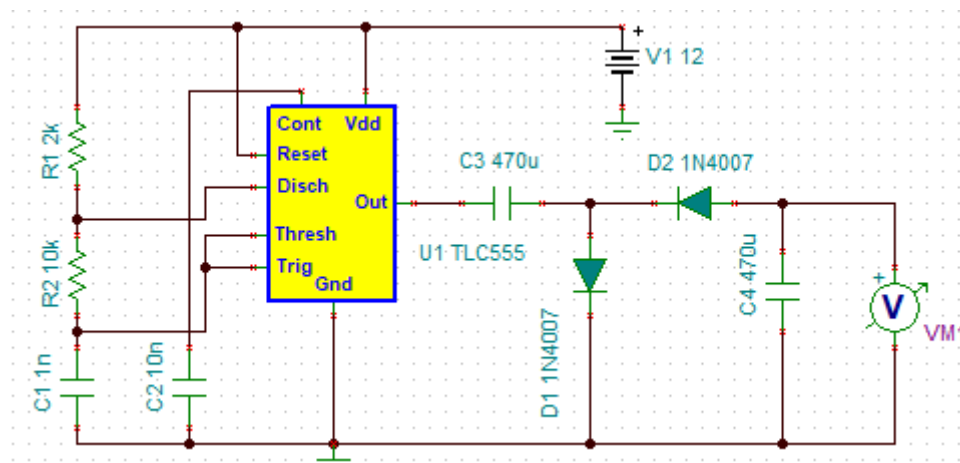


Figura 50. Circuito generador de tensión negativa

Cuando la salida del *timer* se encuentra en nivel bajo la carga del condensador C3 se traslada al condensador electrolítico C4 a través del diodo D2. Como el flujo de corriente va en sentido inverso, el polo positivo de C4 está conectado a tierra, da como resultado una tensión negativa a la salida del circuito:

[illegible]

El dispositivo OPA237¹⁸ es un microamplificador operacional SMD que garantiza un bajo voltaje de offset (del orden de μV), así como una corriente de polarización y de reposo también bajas, permitiendo además un amplio rango de tensión de alimentación. Por la dificultad logística de poder de trabajar con este tipo de

64



arquitectura se opta por la utilización del amplificador operacional TL081¹⁹ de *Texas Instrument* que a pesar de tener una tensión de offset considerablemente más alta que el OPA237 (del orden de mV) esta puede llegar a ser anulada con el ajuste preciso del potenciómetro de 50k Ω de la figura anterior.

El amplificador unitario INA105²⁰ proporciona una alto rechazo al modo común y una alta precisión en su señal de salida independientemente de la alteración que pueda producirse por temperatura trabajando dentro de los rangos requeridos.

El resumen de los componentes utilizados en el diseño, así como su coste total (IVA no incluido) puede verse reflejado en la siguiente tabla:

Part	Value	Device	Package	Description	Price (€)
C1	1nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	CAPACITOR, European symbol	0,17 €
C2	10nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	CAPACITOR, European symbol	0,17 €
C3	470uF	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	POLARIZED CAPACITOR, European symbol	1,88 €
C4	470uF	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	POLARIZED CAPACITOR, European symbol	1,88 €
C5	1uF	CPOL-USE2-5	E2-5	POLARIZED CAPACITOR, American symbol	0,25 €
C6	1uF	CPOL-USE2-5	E2-5	POLARIZED CAPACITOR, American symbol	0,25 €
D1	1N4004	1N4004	DO41-10	DIODE	0,20 €
D2	1N4004	1N4004	DO41-10	DIODE	0,20 €
IC1	NE555	NE555	DIL-08	General purpose bipolar Timer	0,32 €
IC2	RCV420P	RCV420P	DIL16	Precision 4mA to 20mA CURRENT LOOP RECEIVER	8,59 €
IC3	INA105P	INA105P	DIL08	Precision Unity Gain Diff. Amplifier	8,38 €
IC4	TL081P	TL081P	DIL08	OP AMP	1,88 €
R1	1k	R-US_0204/7	0204/7	RESISTOR, American symbol	0,12 €
R2	1k	R-US_0204/7	0204/7	RESISTOR, American symbol	0,12 €
R3	10k	R-US_0204/7	0204/7	RESISTOR, American symbol	0,12 €
R4	10k	R-US_0204/7	0204/7	RESISTOR, American symbol	0,12 €
R5	10k	R-US_0204/7	0204/7	RESISTOR, American symbol	0,12 €
R6	50k	R-TRIMM3296W	RTRIM3296W	Trimm resistor	3,52 €
X1		AK300/6	AK300/6	CONNECTOR	0,33 €
					28,62 €

Tabla 11. Listado de componentes

¹⁹ <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl081.pdf>

²⁰ <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina105.pdf>



8.3 SENSORES DIGITALES

Como valor añadido al *datalogger* se hace uso de dos sensores digitales, el sensor de temperatura y humedad DHT22 y el reloj en tiempo real DS3231

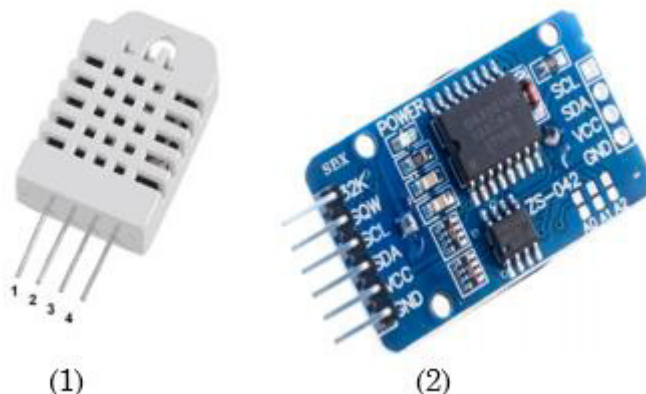


Figura 53. (1) DHT22 (2) DS3231

8.3.1 DHT22

Los elementos sensores que componen el DHT22 son el DS18B20 como dispositivo de medición de temperatura y un condensador de polímero para la medición de la humedad.

El DS18B20²¹ toma la temperatura utilizando dos referencias de tensión de banda prohibida, estas referencias basan su funcionamiento en que la tensión base-emisor de un transistor sea similar a la equivalente de la banda prohibida de un semiconductor. Mediante un ADC la diferencia de estas dos señales se convierte en un número digital que representa la temperatura del dispositivo.

Los sensores capacitivos de polímero orgánico²² se componen de placas paralelas con electrodos porosos en el sustrato. El dieléctrico absorbe o elimina vapor del ambiente, como consecuencia de la variación de la constante dieléctrica se produce un cambio de la capacidad del condensador resultando una impedancia que varía con la humedad.

Los rangos de medida del dispositivo son:

- Temperatura: -40°C a 125°C
- Humedad relativa: 0-100%

²¹ <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20-PAR.pdf>

²² https://www.ecured.cu/Sensor_de_Humedad



8.3.2 DS3231

El RTC (*Real Time Clock*) DS3231 incorpora una batería de manera que, aunque se apague el microprocesador el dispositivo sigue manteniendo la información precisa de segundos, minutos, horas, días, meses y años. Mantiene la fecha incluso teniendo en cuenta los años bisiestos.

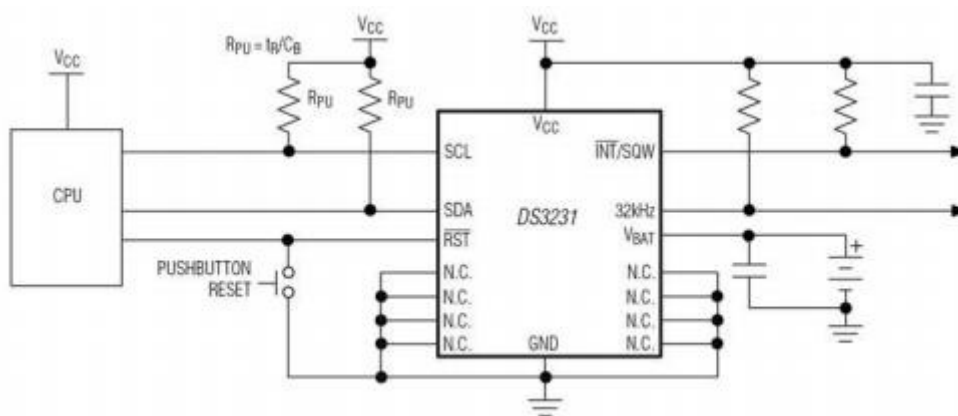


Figura 54. Circuito DS3231

Al contrario que el sensor DHT22 que se conecta a los pines digital de Arduino, el RTC utiliza como sistema de comunicación el estándar I2C (*Inter-Integrated Circuit*). El bus requiere únicamente la utilización de dos cables: la señal de reloj (SCL) y otro para el envío de datos (SDA).

Al igual que en el bus SPI se utiliza una arquitectura maestro-esclavo en el que cada dispositivo dispone de una dirección para acceder de manera individual y de manera síncrona. Para poder realizar la comunicación el bus emplea una trama que consta de:

- 7 bits de dirección
- Un bit para indicar si enviamos o recibimos información R/W
- Un bit de validación (ACK)
- Datos
- Un nuevo de bit de validación

8.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Un requerimiento que tener en consideración son los diferentes niveles de tensión que requieren de alimentación los componentes del sistema. La alimentación de los distintos sensores, acondicionadores de señal y microcontrolador se resumen en la siguiente tabla:

Sensor	Alimentación sensor	Alimentación acondicionador
Desplazamiento (LVDT)	20-32V	
Fuerza (Célula de carga)	5 - 24V	$\pm 2.25 - \pm 18V$
Presión (Transmisor)	12 - 32V	$\pm 12V$
Arduino	7-12V	

Tabla 12. Tensiones de alimentación

Para poder alimentar el sistema, actualmente en el mercado destacan las baterías con tecnología LiFePO_4 conocidas como baterías de litio-ferrofosfato o LFP. Este tipo de baterías recargables utilizan una tecnología derivada de las típicas litio-ion (LiCoO_2 -óxido de litio cobalto-) pero ofrecen una mayor durabilidad, seguridad y potencia específica.

Realizando una comparación con una batería de plomo ácido, las baterías LFP ofrecen las mismas prestaciones de tensión, pero con un peso específico mucho menor. Además de presentar un ciclo de vida útil mucho mayor y una alta seguridad por sobrecarga y variaciones de temperatura.

La batería escogida es la LVIF5-12 del fabricante *Liven Battery*, que proporciona una tensión nominal de 12.8V y una capacidad nominal de $4.8 \pm 0.5\text{Ah}$, tal como indica su ficha técnica.



Figura 55. Batería LVIF5-12

Sin embargo, para alcanzar las altas tensiones de alimentación que requieren los sensores es preciso hacer uso de una fuente de alimentación conmutada *Step Up* o convertidor *Boost* como el de la figura:

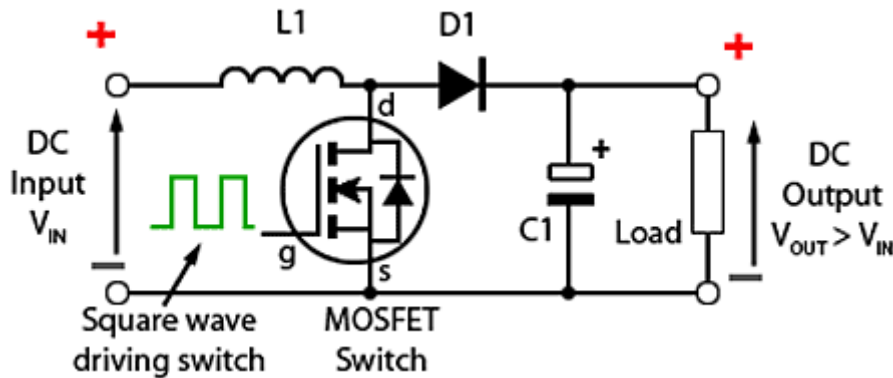


Figura 56. Esquema convertidor Boost

El principio de funcionamiento de este convertidor se basa en que cuando el transistor conduce, el diodo D1 queda polarizado en inverso y la tensión en la inductancia L1 toma el valor de la tensión de entrada V_{IN} , con lo que su corriente evolucionará como una recta con una pendiente positiva V_{IN}/L . Mientras que cuando el transistor está cortado, el diodo D1 queda en directo, de tal manera que queda recirculando la corriente de la inductancia y la tensión de salida del circuito será igual a la suma de la tensión de entrada más la tensión de descarga de la inductancia. El convertidor *Boost* que se va a utilizar es el módulo comercial XL6009:

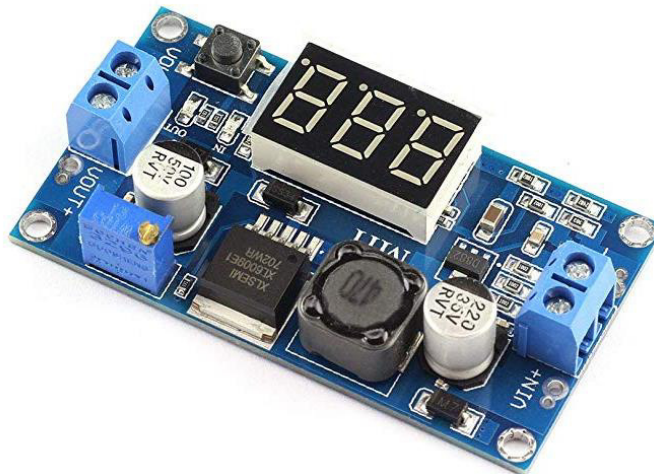


Figura 57. Módulo Boost XL6009

Con este módulo configurado a 21V, gracias al voltímetro digital incorporado y al ajuste del potenciómetro, se alimentará los tres sensores cuyo valor mínimo requerido es de 20V (LVDT) y el máximo 24V (Célula de carga). Mientras que para la alimentación del Arduino la alimentación que requiere es menor de la que provee

la batería, se hace uso de una fuente de alimentación conmutada *Step Down* o convertidor *Buck* cuyo esquema es el siguiente:

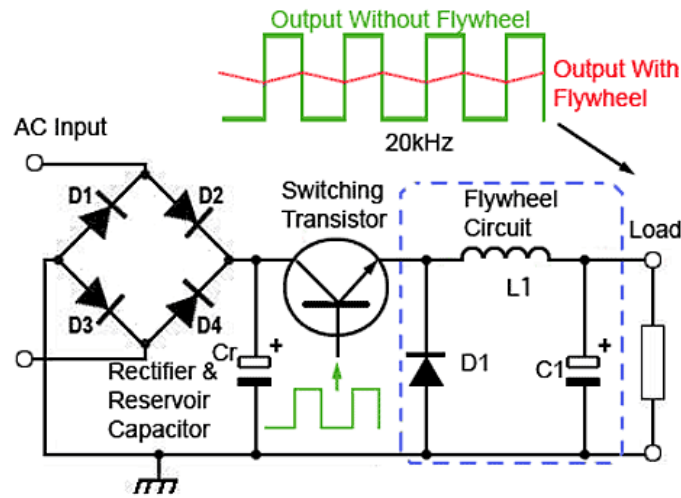


Figura 58. Esquema convertidor Buck

Realizando un análisis tras el puente de diodos, con una tensión continua V_I de entrada. Cuando el transistor conduce el diodo D1 queda polarizado en inverso, con lo que la tensión en la inductancia es constante de valor $V_I - V_o$, por tanto, su corriente evolucionará como una recta de pendiente $V_I - V_o / L1$. En el momento que el transistor está en corte, el diodo queda en directo y la corriente de la inductancia queda recirculando, manteniendo la tensión en la salida. El módulo *Buck* que se va a utilizar es el LM2596:

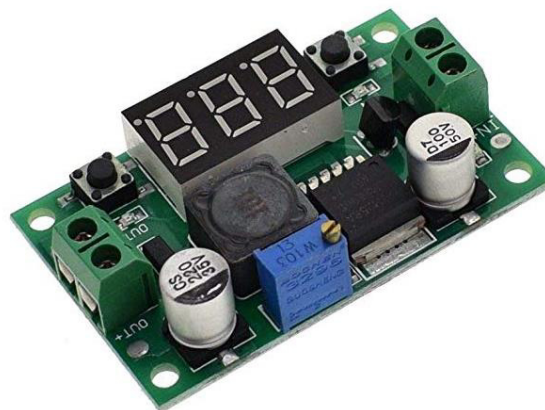


Figura 59. Convertidor Buck LM2596

Este convertidor está ajustado a 9 voltios para alimentar únicamente el Arduino de tal modo de utilizar una fuente independiente del resto con el propósito de eliminar ruido.

8.5 PRUEBAS Y RESULTADOS

8.5.1 Metodología seguida

Una vez conectados todos los circuitos de acondicionamientos necesarios, así como los sensores digitales, a sus respectivas entradas del microcontrolador. Se procede con la calibración inicial requerida (*ver sección 9*) y las pruebas de funcionamiento.

Para probar el sensor LVDT se realiza escalonadamente un incremento del desplazamiento del núcleo ferromagnético del sensor, controlando dicho movimiento con un calibre de precisión y una hoja de papel milimetrado, de manera de poder ver con incrementos de 5mm la respuesta del sensor.



Figura 60. LVDT y calibre utilizado para medición

En lo que respecta al sensor de presión, se ha podido realizar en un entorno controlado, mediante la utilización de una botella de nitrógeno y un manorreductor, variaciones escalonadas de aumento de presión. Gracias al manómetro incorporado en el manorreductor y mediante el uso de otro *datalogger*, conectado con un segundo sensor de presión mediante una T a la salida de la válvula reductora, se ha realizado las pruebas de funcionamiento.

La célula de carga debido a su alto fondo de escala no ha sido posible realizar pruebas en un entorno seguro y controlado para mostrar resultados concluyentes. Una prueba del funcionamiento del amplificador de instrumentación sería realizar una ensayo eléctrico saliendo del rango de amplificación realizado en el circuito.



Figura 61. Manorreductor y botella de nitrógeno (izq.), conexión en T de sensores de presión (drcha.)

En cuanto al sensor digital de temperatura la prueba de funcionamiento se ha realizado mediante la comparación con un termómetro de mercurio a distintos ambientes, para verificar distintas medidas. Sin embargo no se ha podido hacer pruebas concluyentes en la medición del sensor de humedad por falta de herramientas calibradas como el caso de un higrómetro.

8.5.2 Presentación de resultados

El resultado de la medición realizada con el sensor de desplazamiento se muestra en la siguiente figura, como se puede observar presentar una gran linealidad a pesar de la dificultad del desplazamiento provocado debido a la gran sensibilidad que muestra el sensor:

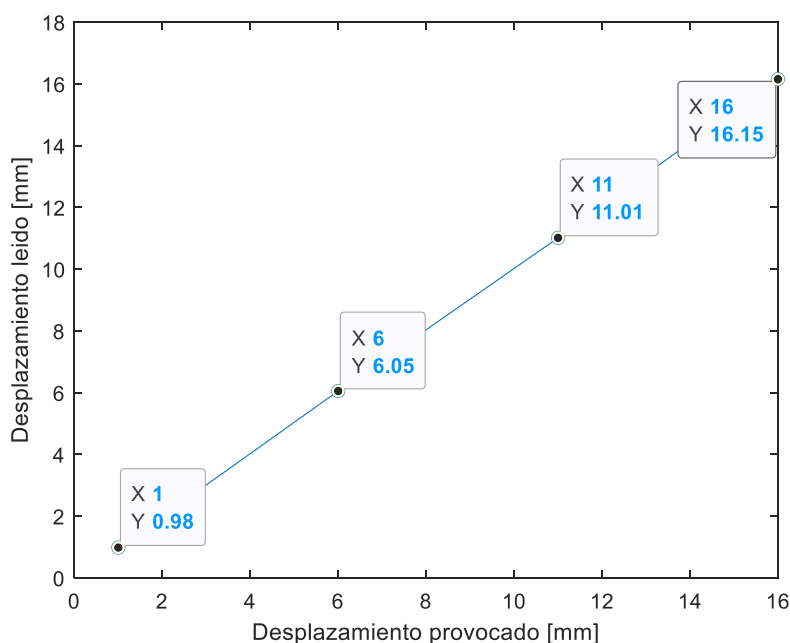


Figura 62. Comparación de las medidas realizadas con el sensor LVDT



Los resultados del sensor de presión se presentan en la siguiente figura, verificados con el manómetro y con otra herramienta calibrada y conectada a otro sensor de presión. Como se puede ver en el resultado presentado, muestra también una gran correlación en las comparativa de medidas:

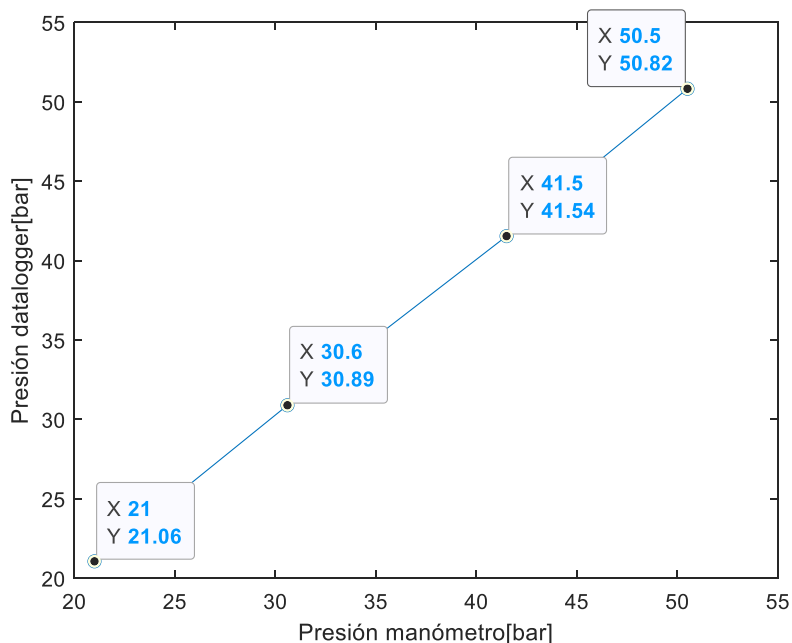


Figura 63. Comparación de las medidas realizadas por el sensor de presión

En cuanto a la medición de la temperatura, la lectura del termómetro puede resultar ciertamente subjetiva y no ajustarse a la precisión de medida del sensor, pero aproximadamente la prueba se puede dar por válida al estar dentro del rango marcado por el termómetro de mercurio.



Figura 64. Comparación en la medición de temperatura

9 MANUAL DE USUARIO

A continuación se procede a desarrollar los distintos ajustes que el operario del *datalogger* debe realizar antes de dar comienzo a la realización de ensayos:

9.1 AJUSTE DE LA BATERÍA

Una vez completada la carga de la batería (0,5 – 1h con un cargador de 12V y 1A), se acopla en el habitáculo dispuesto y se ajusta el anclaje pertinente mediante el apriete de cuatro tuercas de sombrerete de métrica 4. A continuación se conectan los terminales eléctricos *faston* correspondientes (rojo-borna positiva, negro-borna negativa) con cuidado de que los cables de conexión no entorpezcan el cierre de la maleta.



Figura 65. Disposición de la batería

Una vez conectada la batería se puede proceder al encendido del equipo mediante el interruptor verde exterior. Dos de los sensores requieren inicialmente un ajuste previo en sus respectivos circuitos de acondicionamiento: el sensor inductivo de desplazamiento LVDT y el sensor de presión.

9.2 AJUSTE INICIAL DEL SENSOR DE DESPLAZAMIENTO

Para el correcto funcionamiento del sensor SM260.24.2, el fabricante indica que, el circuito de acondicionamiento SM127 requiere de dos ajustes básicos iniciales para la medida lineal máxima de 24mm:

- Ajuste básico del punto cero: sin conectar el transductor al equipo, la señal de salida del circuito SM127 (A1) referenciada al terminal negativo ($-V_B$) debe de ser de 5.0V. Por lo que en la pantalla del equipo debe marcar su valor medio de 12.00mm. Para ajustar la tensión de salida requerida se hará uso del potenciómetro N1 hasta alcanzar el valor requerido
- Ajuste inicial de ganancia: una vez conectado el transductor a su toma correspondiente, el fabricante indica textualmente que mediante procedimientos mecánicos se lleve la varilla a la posición neutra, dando nuevamente la señal de salida 5.0V (12mm en pantalla) como en el ajuste del punto cero. Desde esa posición se regula la varilla un cuarto del desplazamiento total a medir, es decir, para los 24mm totales del sensor hay que trasladarlo +6 o -6mm según la dirección tomada. Con el potenciómetro V1 la señal de salida debe ser 2,5 o 7,5V según la dirección que se haya desplazado la varilla. La pantalla debe marcar 6 ó 18mm.

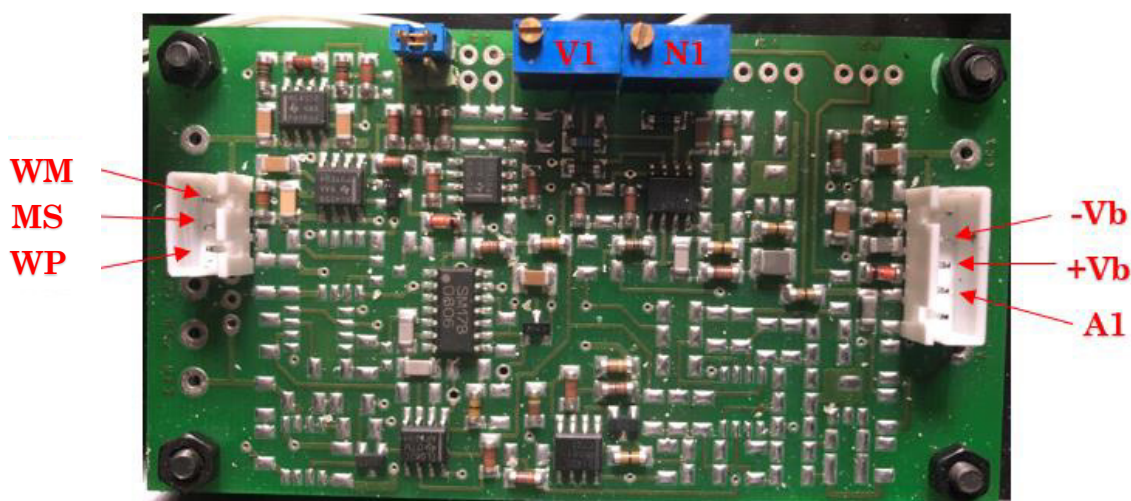


Figura 66. Conexiones y potenciómetros del circuito SM127

9.3 AJUSTE INICIAL DEL SENSOR DE PRESIÓN

Con el sensor de presión conectado al equipo, el valor mínimo de intensidad recibido desde este no siempre corresponde al valor exacto de 4mA para 0 bares de presión. Según que sensor se utilice se observa que este valor mínimo puede oscilar entre 4,01 a 4,03mA, modificando el valor mínimo de la presión. En el circuito acondicionador se dispone de un potenciómetro (ver figura) con el fin de poder ajustar el valor de offset a 0V, en la pantalla el valor mostrado debe ser de 0 bares de presión.

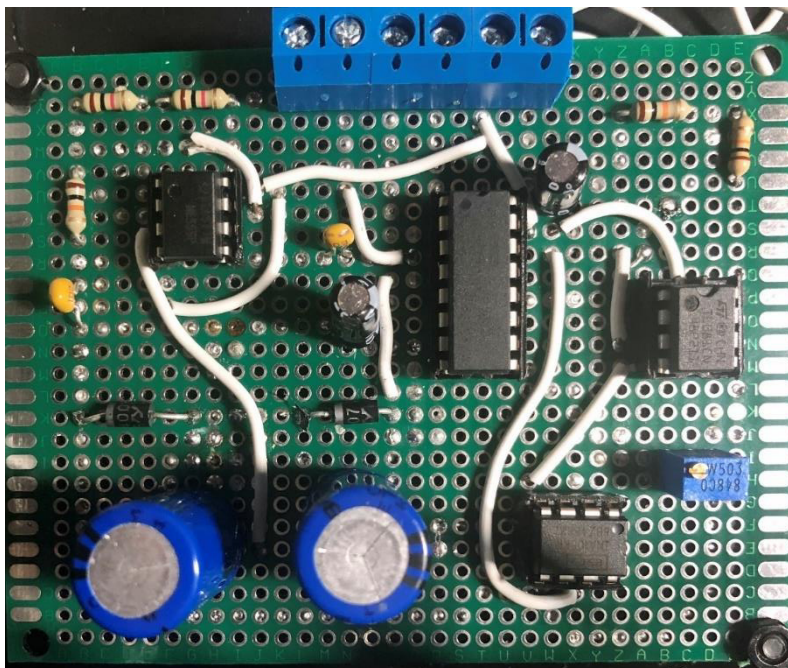


Figura 67. Circuito acondicionador del transductor de presión

Una vez alimentado el circuito y el transductor de presión cuya señal de salida es de 4.00 mA el offset del circuito inicial es de 2.03V, realizando el ajuste del potenciómetro de 50k Ω se consigue una señal de salida del circuito de 0V.

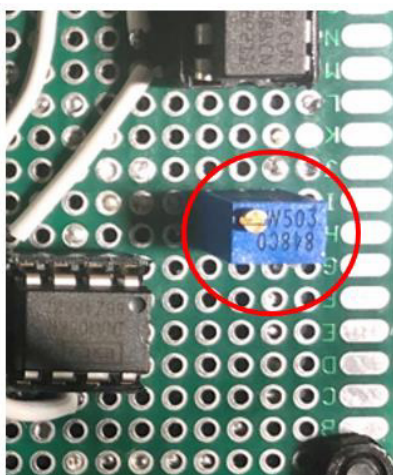


Figura 68. Potenciómetro de ajuste del offset del circuito acondicionador de presión

Una vez realizados estos ajustes descritos, a priori no es preciso volverlos a realizar para cada medida que se realice dentro de un mismo ensayo con el equipo, basta con realizar la conexión de los sensores en sus respectivos conectores aéreos de 4 pines. Si bien se recomienda realizar una comprobación antes de la primera medida por cada nuevo ensayo.



Figura 69. Terminales de conexión de los sensores

9.4 FUNCIONAMIENTO

Una vez calibrados los circuitos de acondicionamiento e iniciado el sistema, la pantalla inicial muestra la siguiente información con los sensores principales desconectados:



Figura 70. Pantalla de inicio datalogger



Cuando ya se realiza la conexión de los sensores al equipo, en la pantalla se actualiza periódicamente la medida recibida por estos, en caso de requerir una captura controlada de los datos registrados se debe ajustar en la parte superior izquierda la frecuencia de muestreo, es decir cada cuanto tiempo se envía la medición de las magnitudes al PC en un rango de 0 a 99 segundos.

En la parte central superior se disponen de dos botones: el botón de *Pzero*, para establecer el valor mínimo que toma el sensor sin excitación ninguna por software en caso de que el ajuste inicial no sea correcto o suficiente y el botón de *Muestra* que inicia la comunicación por el puerto serie con el PC y además el cronometro de la parte inferior derecha (*Tiempo captura*) para dar conocimiento del tiempo que se están registrando los datos. Una vez accionado el botón de *Muestra* en la pantalla se muestra la siguiente información tras un minuto de captura de medidas:



Para poder mostrar gráficamente la evolución de las medidas respecto al tiempo en el PC se recomienda hacer uso del programa gratuito Arduino LiveSerial²³. Este programa permite, además ver en tiempo real la evolución de las distintas mediciones, exportar los datos a formato *.csv*, (delimitado por comas), formato *.xlsx* (Microsoft Excel) y a formato *.json* (Javascript) de forma sencilla. Un ejemplo de captura de los datos se muestra en la siguiente figura:

²³ <https://www.luisllamas.es/arduino-liveserial/>

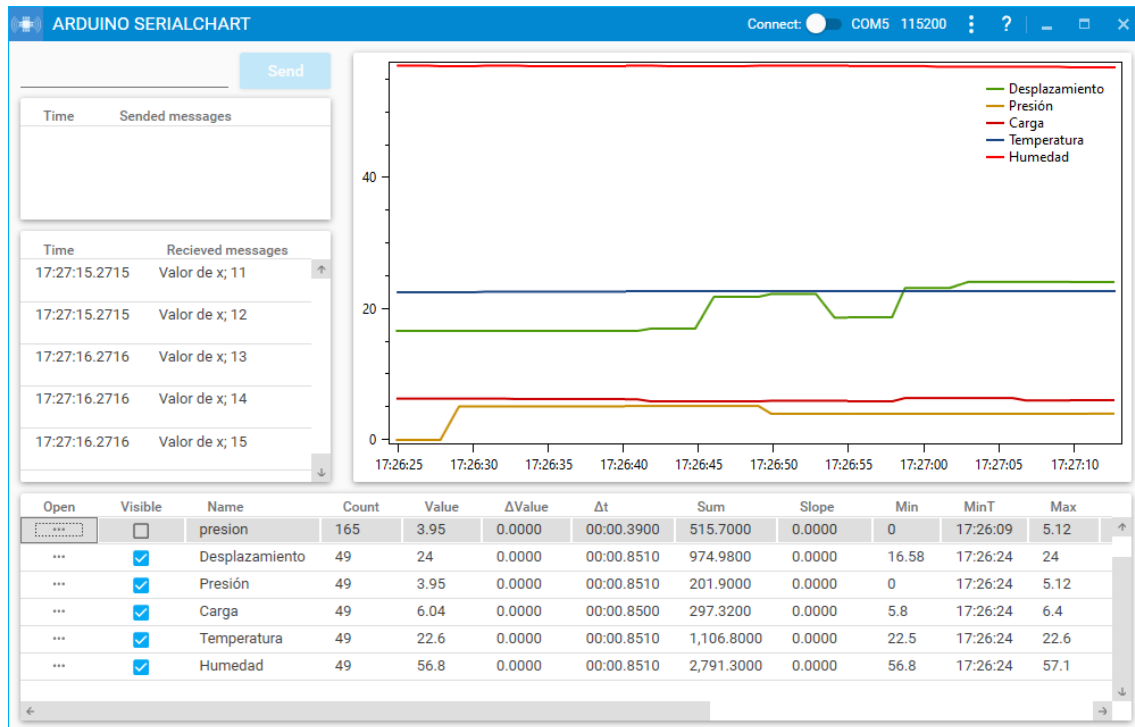


Figura 71. Resultados en LiveSerial

En esta captura se muestra la evolución de todas las magnitudes al estar todas seleccionadas, pero se da la posibilidad de solo mostrar evolución de una de las medidas.



10 CONCLUSIONES

La herramienta desarrollada en este proyecto, desde el punto de vista de la ingeniería geológica puede destacar por su versatilidad, al ser válida para distintos tipos de ensayos tanto en laboratorio como *in situ* en el terreno que puede realizar. Desde un punto de vista electrónico la herramienta puede ser mejorable en algunos aspectos.

El uso de un microcontrolador como Arduino facilita desde un punto vista la programación para la interpretación de los datos recibidos, sin embargo, en algunos aspectos se observa que limita la eficacia de la herramienta. El Arduino Mega 2560 trabaja con un oscilador de 16MHz por lo que la velocidad de ejecución puede llegar a resultar algo lenta en cuanto la actualización en pantalla de algunas de las medidas, como en el caso del sensor de desplazamiento, frente a trabajar por ejemplo con el Arduino Due que funciona a 84 MHz, pero este controlador tiene limitada la tensión de los pines E/S a 3.3V con lo que se perdería bastante rango en la medida al tener que limitar el SPAN.

Otra aspecto mejorable de la herramienta sería la posibilidad de ajuste a otros puntos de trabajo y al uso de otros sensores del mismo tipo con nuevos rangos de medida sin la necesidad de una nueva codificación del microcontrolador. Dentro de las células de presión que hay en el mercado, existen muchos fondos de escala disponibles, pero esta herramienta requeriría para poder ajustar la medida a ese nuevo rango una reprogramación. Y en caso de utilizar una célula de carga distinta, requeriría además un nuevo circuito de acondicionamiento, ya que los amplificadores de instrumentación comerciales que permiten su ajuste de ganancia mediante un potenciómetro no permiten que ese valor sea tan exacto como el que presenta una resistencia fija de baja tolerancia, además que también obligaría a una nueva programación del procesador para poder dar una lectura lo más fiable posible que es lo que se busca con que esta herramienta.

Uno de los mayores inconvenientes, sobre todo en lo que se refiere a los ensayos *in situ* sobre el terreno, sigue siendo que para las líneas de transmisión desde el transductor se requieren de largas longitudes de cableado, en algunos casos hasta decenas de metros para poder recibir la información de la medida realizada.

Este tipo de herramientas se construyen de una manera *ad hoc* para capturar los datos recibidos desde unos sensores específicos, lo que obliga que la instrumentación electrónica, tanto para los estudios geofísicos como geotécnicos, tenga que rediseñarse para cada aplicación. Sería interesante que dentro de un rango razonable los sistemas de adquisición pudieran autoajustarse para poder trabajar con diferentes tipos de sensores sin necesidad de modificaciones.



11 BIBLIOGRAFÍA

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. y OTEO, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. ISBN: 978-8420-531045.
- BOWLES, J. (1982) *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. ISBN: 978-9684-511187.
- BRAJA, M. DAS. (2013) *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cuarta edición. ISBN: 978-1111-576752.
- MORILLA ABAD, I. (2017) *Interpretación de los Ensayos Geotécnicos en Suelos*
- DEVINCENZI, M.; FRANK, N. (2004). *Ensayos geotécnicos in situ*
- TOMÁS, R; SANTAMARTA, J.C.; CANO, M. HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, L.E.; GARCÍA-BARBA, J (2013). *Ensayos geotécnicos de suelos y rocas*, Universidad de Alicante. CD-ROM. ISBN: 978-8461-653973.
- DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERIA DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Geotecnia I (2010) <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=189§ion=4>
- DIAZ RODRIGUEZ, J.; JIMENEZ CALVO, J.A. Y MECA MECA, F.J. (1994) *Introducción a la Electrónica de Medida I*
- DIAZ RODRIGUEZ, J.; JIMENEZ CALVO, J.A. Y MECA MECA, F.J. (1994) *Introducción a la Electrónica de Medida II*
- PEREZ GARCIA, M.A. (2014) *Instrumentación electrónica*
- GRANDA MIGUEL, M.; MEDIAVILLA BALADO, E. (2010) *Instrumentación electrónica: Transductores y acondicionadores de señal*
- APUNTES PARA INSTRUMENTACION ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/
- TUTORIALES ARDUINO: <https://www.luisllamas.es/>



12 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN ARDUINO

```

/*****Sistema registrador de datos para estudios geofísicos*****/
/*****
/*****José Javier Fernández-Pacheco Cuesta*****/
/*****
/*****Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones*****/
/*****
/*****Universidad de Alcalá*****/
/*****

/***** Librerías Arduino *****/

#include <DHT.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <MCUFRIEND_kbv.h>
#include <TouchScreen.h> //
#include <Arduino.h>
#include <Math.h>
#include <TimerOne.h>
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"

/*****Iniciación componentes*****/

#define LCD_CS A3 // Chip Select goes to Analog 3
#define LCD_CD A2 // Command/Data goes to Analog 2
#define LCD_WR A1 // LCD Write goes to Analog 1
#define LCD_RD A0 // LCD Read goes to Analog 0
#define LCD_RESET A4 // Can alternately just connect to Arduino's reset
pin
#define          LIVESERIAL(id,          value)          {
Serial.print(id); Serial.print(':'); Serial.println(value); }
#define LIVESERIAL_MILLIS(id, value) { unsigned long ms = millis();
Serial.print(id); Serial.print(':'); Serial.print(value); Serial.pri
nt('@'); Serial.println(ms); }
MCUFRIEND_kbv tft;
RTC_DS3231 rtc; //Real-Time-Clock modelo DS3231

const int XP=8,XM=A2,YP=A3,YM=9; //ID=0x9486 pantalla
const int TS_LEFT=945,TS_RT=94,TS_TOP=883,TS_BOT=138;//ajuste de
parametros de la pantalla táctil
TouchScreen ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 300);
TSPoint tp;

#define MINPRESSURE 200 //Presión mínima pantalla táctil
#define MAXPRESSURE 1000 //Presión máxima pantalla táctil

/***** Valor hexadecimal gama de colores*****/

#define BLACK 0x0000
#define PURPLE 0x780F
#define RED 0xF800
#define WHITE 0xFFFF

/*****Definición de pines de entrada de los sensores*****/
#define sensor_des A8// seleccionar la entrada para el sensor de
desplazamiento

```



```
#define sensor_pres A10 // seleccionar la entrada para el sensor de
presión
#define sensor_carga A12 // seleccionar la entrada para el sensor de
carga
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22(AM2302) //Sensor digital de temperatura
y humedad
#define DHTPIN 23 //pin digital 2
DHT dht (DHTPIN, DHTTYPE);

/*****Variables*****/

int t=0, t0=0, t1=0, t2=0, i=0, x=0, j=0, minutos=0, segundos=0,
decimas=0, decenas=0;
int8_t unidad=1, decena=0; //Muestreo mínimo cada segundo
int sensor1, sensor2, sensor3; //Variable que almacena el valor raw (0 a
1023)
float desplazamiento, presion, carga; // variable a mostrar
int muestreo, boton=0, crono=0, presionmin, presionmax, cargamin;
float h = dht.readHumidity(); //Humedad
float temp = dht.readTemperature(); //Temperatura
float Promedioc=0, Promediocm=0, Promediop=0, Promediopm=0, Promediocm=0;
String daysOfTheWeek[8] = {"", "Lunes", "Martes", "Miércoles", "Jueves",
"Viernes", "Sábado", "Domingo" };
String monthsNames[13] = {"", "Enero", "Febrero", "Marzo", "Abril",
"Mayo", "Junio", "Julio", "Agosto", "Septiembre", "Octubre",
"Noviembre", "Diciembre" };

void show_tft(void) //Función para mostrar pantalla principal
{
    tft.fillRect(0, 0, 479, 13, RED); //Rectángulo desde la
coordenada (0,0) a (479,13) para título
    tft.fillRect(21, 22, 160, 13, RED); //Rectángulo muestras/s
    tft.fillTriangle(21, 66, 35, 41, 49, 66, RED); //más decenas
    tft.fillTriangle(21, 90, 35, 114, 49, 90, RED); //menos decenas
    tft.fillTriangle(152, 66, 166, 41, 180, 66, RED); //más unidades
    tft.fillTriangle(152, 90, 166, 114, 180, 90, RED); //menos unidades
    tft.fillRect(211, 35, 120, 75, RED); //Manual
    tft.fillRect(351, 35, 120, 75, RED); //Muestra
    tft.fillRect(16, 129, 145, 13, RED); //Rectángulo desplazamiento
    tft.fillRect(179, 129, 140, 13, RED); //Rectángulo presión
    tft.fillRect(336, 129, 140, 13, RED); //Rectángulo carga
    tft.fillRect(16, 250, 145, 13, RED); //Rectángulo desplazamiento
    tft.fillRect(179, 250, 140, 13, RED); //Rectángulo presión
    tft.fillRect(336, 250, 140, 13, RED); //Rectángulo carga

    tft.setTextColor(WHITE, RED);
    tft.setTextSize(1);
    tft.setCursor(190, 2);
    tft.print("Medidor de prospeccion");
    tft.setCursor(65, 24);
    tft.print(" Muestras/s ");
    tft.setCursor(22, 131);
    tft.print(" Desplazamiento [mm]");
    tft.setCursor(201, 131);
    tft.print(" Presion [Bar]");
}
```



```

tft.setCursor(382, 131);
tft.print(" Carga[T] ");
tft.setCursor(25, 252);
tft.print("Temperatura (*C)");
tft.setCursor(212, 252);
tft.print("Humedad % ");
tft.setCursor(352, 252);
tft.print("Tiempo captura (s) ");
tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(375, 63);
tft.print("Muestra");
tft.setCursor(231, 63);
tft.print("Pzero");
tft.setTextColor(WHITE, BLACK);
tft.setTextSize(5);
tft.setCursor(75, 64);
tft.print(decena);
tft.setCursor(105, 64);
tft.print(unidad);
}

void setup() // Función de configuración
{
    dht.begin();
    tft.reset();
    uint16_t ID = tft.readID();
    tft.begin(ID);
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin();
    // Si se ha perdido la corriente, fijar fecha y hora
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
    tft.fillScreen(BLACK);
    tft.setRotation(1); //Landscape, vista horizontal de la pantalla
    show_tft(); //mostrar pantalla principal
    Timer1.initialize(100000); //Inicializa el timer con el valor
    puesto en microsegundos (100ms).
    Timer1.attachInterrupt(touch); // Activa la función específica
    como interrupción
}

void touch() //Función para "leer" cuando se toca la pantalla, se
actualiza cada 100ms
{
    if (tp.x > 730 && tp.x < 800 && tp.y > 870 && tp.y < 930)
decena++;
    if (decena>9) decena=9;
    if (tp.x > 610 && tp.x < 680 && tp.y > 870 && tp.y < 930) decena-
-;
    if (decena<0) decena=0;
    if (tp.x > 730 && tp.x < 800 && tp.y > 660 && tp.y < 690)
unidad++;
    if (unidad>9) unidad=9;
    if (tp.x > 610 && tp.x < 680 && tp.y > 660 && tp.y < 690) unidad-
-;
    if (unidad<0) unidad=0;

    t=t+1;
    if (t%10==0){
        refresca(); // Cada segundo se llama a la función
refresca
    }
}

```



```

    if (crono>0) { //Iniciar cronometro de tiempo muestreando las
señales de los sensores

        decimas++;
    if(decimas == 10){ //décimas de segundo
        decimas = 0;
        segundos++;
    }
    if(segundos==10) { //unidades de segundo
        segundos=0;
        decenas++;
    }
    if(decenas == 6) { //decenas de segundo
        decenas = 0;
        minutos=minutos+1;
    }
    if(minutos == 60){
        minutos = 0;
        decenas=0;
        segundos=0;
        decimas=0;
    }
}

void printDate(DateTime date) //Función para mostrar fecha y hora en la
pantalla principal
{
    tft.setTextColor(WHITE, RED);
    tft.setTextSize(1);
    tft.setCursor(2, 2);
    tft.print(daysOfTheWeek[date.dayOfTheWeek()]);
    tft.print(", ");
    tft.print(date.day());
    tft.print(" de ");
    tft.print(monthsNames[date.month()]);
    tft.print(" de ");
    tft.print(date.year());
    tft.setCursor(420, 2);
    tft.print(date.hour());
    tft.print(':');
    tft.print(date.minute());
    tft.print(':');
    tft.print(date.second());
}

void refresca() // Actualizamos cada segundo valor de humedad,
temperatura y "semáforos" de las funciones
{
    h = dht.readHumidity();
    temp = dht.readTemperature();
    t0=t0+1;
    t1=t1+1;
    t2=t2+1;
}

void boton_pzero() //puesta a cero, leemos el valor mínimo de los
sensores sin excitar
{
    tft.fillRect(211,35,120,75,PURPLE); //Manual
    tft.setTextColor(WHITE, PURPLE);

```



```

    tft.setTextSize(2);
    tft.setCursor(231, 63);
    tft.print("Pzero");
    presionmin=analogRead(sensor_pres);
    cargamin=analogRead(sensor_carga);
    tft.fillRect(211,35,120,75,RED); //Manual
    tft.setTextColor(WHITE, RED);
    tft.setCursor(231, 63);
    tft.print("Pzero");
}

void boton_muestra_desactivado() //Envío de datos muestreados OFF
{
    tft.fillRect(351,35,120,75,RED); //Muestra
    tft.setTextSize(2);
    tft.setTextColor(WHITE, RED);
    tft.setCursor(375, 63);
    tft.print("Muestra");
    boton=0;
    t2=0;
    crono=0;
    minutos=0;
    segundos=0;
    decimas=0;
    decenas=0;
    tft.setTextColor(WHITE, BLACK);
    tft.setTextSize(3);
    tft.setCursor(375,280);
    tft.print(minutos);
    tft.print(":");
    tft.print(decenas);
    tft.print(segundos);
}

void boton_muestra_activado() //Envío de datos muestreados ON
{
    t2=0;
    tft.fillRect(351,35,120,75,PURPLE); //Muestra
    tft.setTextColor(WHITE, PURPLE);
    tft.setTextSize(2);
    tft.setCursor(375, 63);
    tft.print("Muestra");
    boton=1;
    crono=1;
}

void loop() //Función lazo principal
{
    while(Serial.available())
    {
        Serial.print((char)Serial.read());
    }
    DateTime now = rtc.now();
    printDate(now);
    muestreo = (decena*10)+unidad;
    uint16_t xpos, ypos; //screen coordinates
    tp = ts.getPoint();
    pinMode(XM, OUTPUT);
    pinMode(YP, OUTPUT);
    if (tp.x > 610 && tp.x < 800 && tp.y > 380 && tp.y < 580)

```



```

        {
            if(boton==0){
                boton_pzero();
            }
        }
    if (tp.x > 610 && tp.x < 800 && tp.y > 150 && tp.y < 320)
    {
        if (boton==1){
            boton_muestra_desactivado();
        }
        else if(boton==0)
        {
            boton_muestra_activado();
        }
    }

    if(muestreo==t2 && boton == 1) //tiempo de muestreo = t2 y botonera
    en posición de muestra
    {
        boton_muestra_activado();
        mandar();
    }

    if(t0 >=1) //si t0 mayor igual a 1 muestro en pantalla medición,
    refresco DATOS cada segundo
    {
        pantalla();
    }

    /*****Desplazamiento*****/

    sensor1 = analogRead(sensor_des);
    sensor1 = map(sensor1,0,1023,0,2400);
    if (i<=10) {
        Promediod=Promediod+sensor1;
        i=i+1;
    }
    if (i==10) {
        i=0;
        Promediodm=Promediod/10;
        Promediod=0;
    }

    desplazamiento = Promediodm / 100; //valor mostrado en pantalla

    /*****Presión*****/

    sensor2 = analogRead(sensor_pres); // realizar la lectura
    sensor2 = map(sensor2,presionmin,1023,0,2475);

    if (x<=50) {
        Promediop=Promediop+sensor2;
        x=x+1;
    }
    if (x==50) {
        x=0;
        Promediopm=Promediop/50;
        Promediop=0;
        presion=Promediopm/10; //valor mostrado en
pantalla

```




```

        if (presion <= 0){
            presion=0;
        }
    }

    /*****Carga*****/

    sensor3 = analogRead(sensor_carga);          // realizar la lectura
    sensor3 = map(sensor3,cargamin,1023,0,5000);

    if(j<=20)    {
        Promedioc=Promedioc+sensor3;
        j=j+1;
    }
    if(j==20)    {
        j=0;
        Promediocm=Promedioc/20;
        Promedioc=0;
    }
    carga=Promediocm/100;

} //Fin función Loop

void pantalla() //Función para mostrar valores medidos en pantalla
{
    tft.setTextColor(WHITE, BLACK);
    tft.setTextSize(3);
    tft.setCursor(40, 160);
    tft.print(desplazamiento); //sensor desplazamiento
    tft.setCursor(201, 160);
    tft.print(presion); // sensor presión
    tft.setCursor(375, 160);
    tft.print(carga); //
    tft.setCursor(55, 280);
    tft.print(temp); //Temperatura
    tft.setCursor(212, 280);
    tft.print(h); //Humedad
    tft.setCursor(375,280);
    tft.print(minutos);
    tft.print(":");
    tft.print(decenas);
    tft.print(segundos);
    tft.setTextColor(WHITE, BLACK);
    tft.setTextSize(5);
    tft.setCursor(75, 64);
    tft.print(decena);
    tft.setCursor(105, 64);
    tft.print(unidad);
    t0=0;
}

void mandar() //Función para enviar datos a programa LIVESERIAL
{
    LIVESERIAL_MILLIS("Desplazamiento", desplazamiento);
    LIVESERIAL_MILLIS("Presión", presion);
    LIVESERIAL_MILLIS("Carga", carga);
    LIVESERIAL_MILLIS("Temperatura", temp);
    LIVESERIAL_MILLIS("Humedad", h);
}

```

13 ESQUEMÁTICOS DE LOS CIRCUITOS REALIZADOS DE ACONDICIONAMIENTO

13.1 SENSOR DE PRESIÓN

La disposición de los componentes en un PCB de 7x9cm, así como el ruteado de las pistas del circuito queda reflejado en la siguiente figura donde las líneas rojas marcan las pistas en la capa superior de la placa y las azules en la inferior:

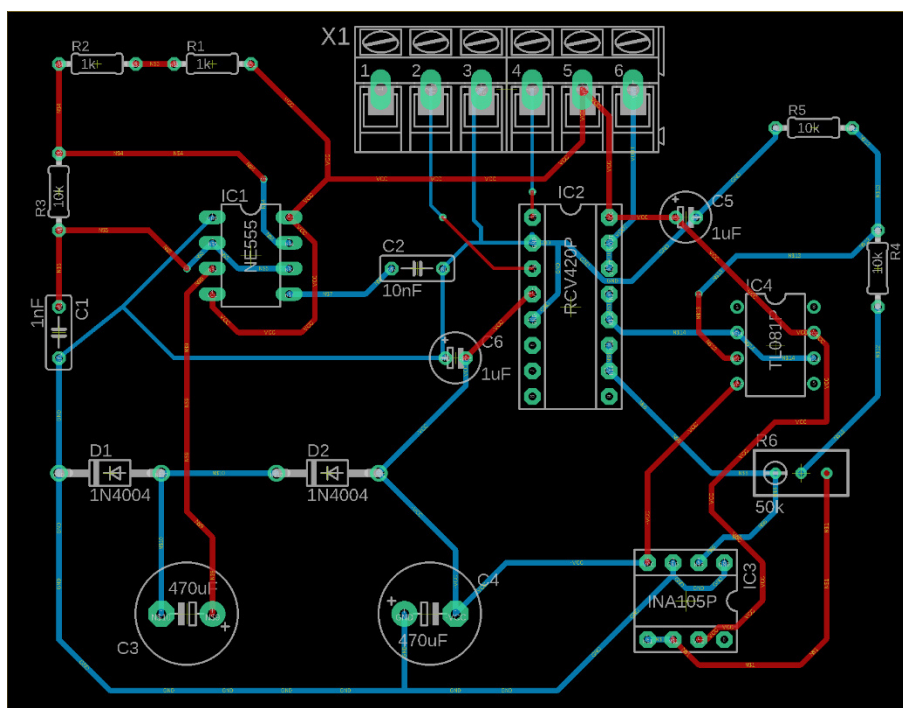


Figura 72. Disposición de los componentes en PCB y ruteado de pistas

El esquemático completo del circuito puede verse en la figura siguiente donde el conector de entrada al circuito dispuesto de 6 entradas/salidas tiene la siguiente configuración:

- 1 → V^- (tensión negativa generada)
- 2 → I_{IN+} (entrada positiva de corriente desde el sensor)
- 3 → GND (polo negativo desde la fuente de alimentación)
- 4 → I_{IN-} (entrada negativa de corriente desde el sensor)
- 5 → V_{CC} (polo positivo desde la fuente de alimentación)
- 6 → V_{out+} (tensión de salida positiva)

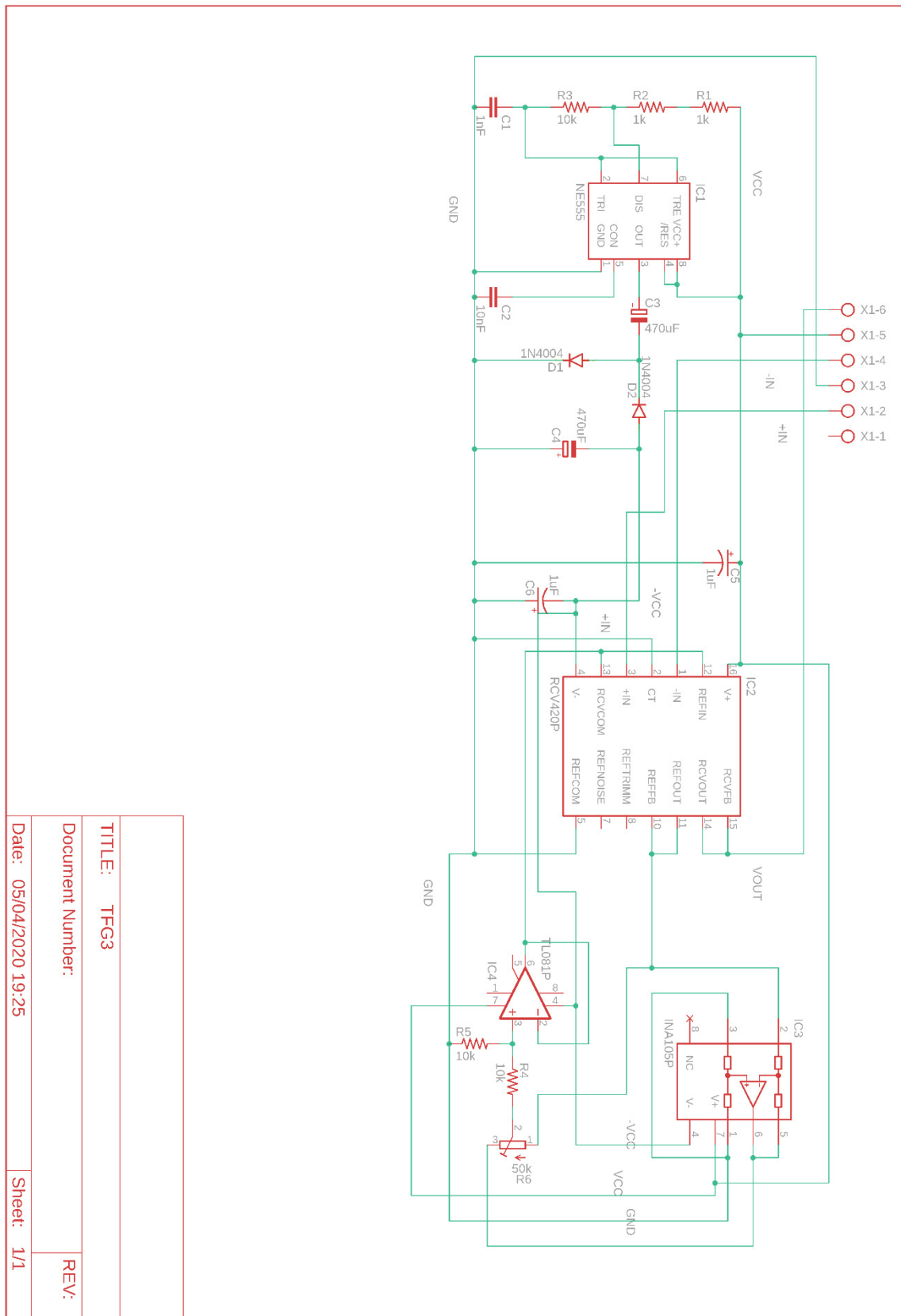


Figura 73. Esquemático circuito completo de acondicionamiento de RCV420



13.2 CÉLULA DE CARGA

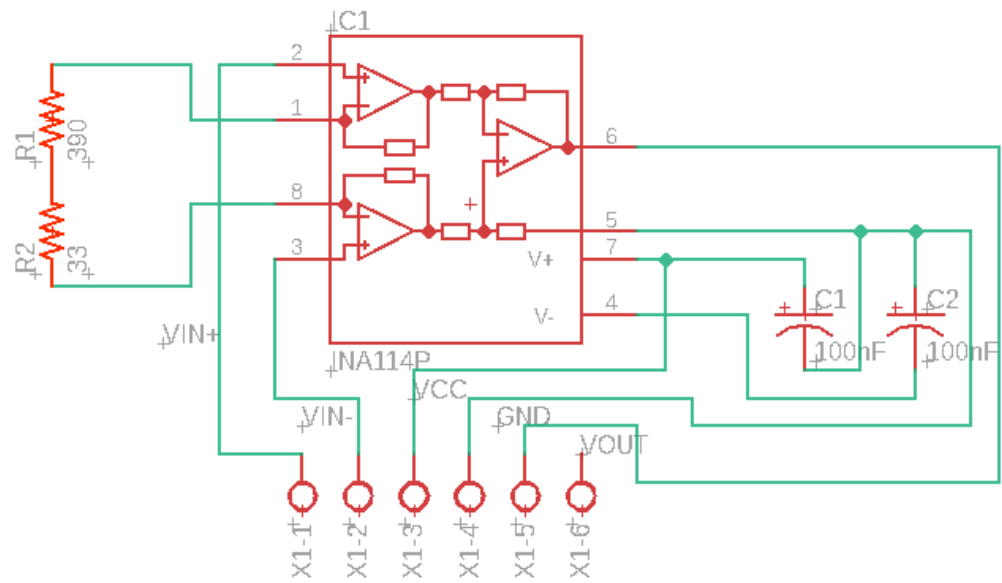


Figura 74. Esquemático del circuito acondicionador de carga

Sensor inductivo de desplazamiento

Desplazamiento desde 24 hasta 360 mm

SCHREIBER
M E S S T E C H N I K
DIN ISO 9001

Serie

SM26 SM28



Desplazamiento estándar:

Serie SM260	24mm	40mm	60mm	100mm	200 mm
Serie SM280	80mm	170mm	240mm	360mm	

Modelos:

SM2x0	con núcleo libre
SM2x0 .T	palpador
SM2x0 .GH	con rótulas

Datos técnicos:

(para operar con nuestros amplificadores)	
Linealidad	<0,5% ó 0,25%
Desviación del cero fun. temp.	< 0,01% / °C
Rango de temp. con conector	-40 °C hasta + 85 °C
Rango de temp. con cable	-40 °C hasta + 100 °C
Resistencia al choque	250 g SRS 20....2000 Hz
Resistencia a las vibraciones	20 g rms (puntas de 50 g)
Grado de protección	hasta IP 68*

* IP 66 con salida conector tipo BI423

* IP 68 con salida mediante cable

- Desplazamiento hasta 360 mm
- Diámetro carcasa 10 mm.
- Grado de protección IP 68
- Linealidad 0,5% (opción 0,25%)
- Amplificación externa.
- Posibilidad de palpador

Construcción y funcionamiento:

En el interior de una bobina se desplaza axialmente un núcleo de NiFe. La posición de este núcleo produce la correspondiente distribución de inductividad en ambas mitades, que se transforma mediante un amplificador externo en una señal proporcional al recorrido.

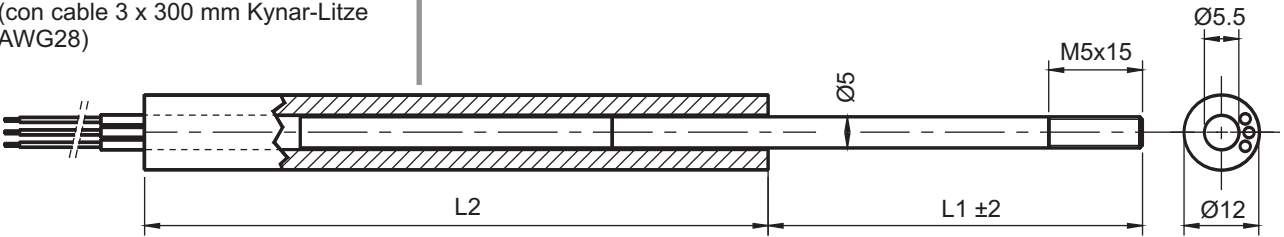
SM260 Standard

Dimensiones y pesos:

Desplaz. mm	L1mm	L2mm	Peso	Núcleo
24	42	100	40g	20g
40	50	140	50g	25g
60	60	170	65g	25g
100	80	270	110g	35g
150	105	350	135g	45g
200	130	500	175g	56g

SM260 Núcleo libre

(con cable 3 x 300 mm Kynar-Litze
AWG28)



SM280 Standard

Dimensiones y pesos:

Desplaz. mm	L1mm	L2mm	Peso	Núcleo
80	70	140	100g	30g
170	115	250	140g	50g
240	150	350	200g	60g
360	210	500	270g	80g

SM260 .T Palpador

(con cable 3 x 300 mm de Kynar)

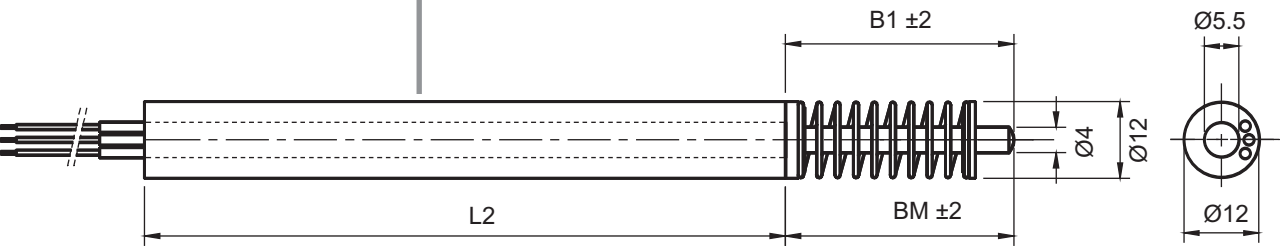
Modelos estándar:

SM260 .T	con cable Kynar AWG28
SM260 .ST	con conector

Dimensiones:

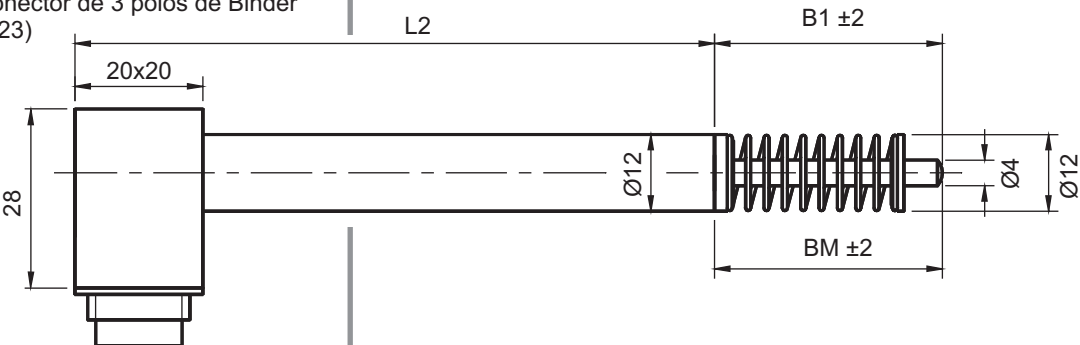
Desplaz. mm	BM mm	B1 mm	over-travel mm	Fm N
24	45	63	8	~4
40	70	98	7	~4
60	75	110	2	~4
100	140	198	11	~4
150	199	248	13	<4

BM: palpador en medio recorrido B1: palpador extendido Fm: esfuerzo a medio recorrido



SM260 .ST Palpador

(con conector de 3 polos de Binder
serie 723)

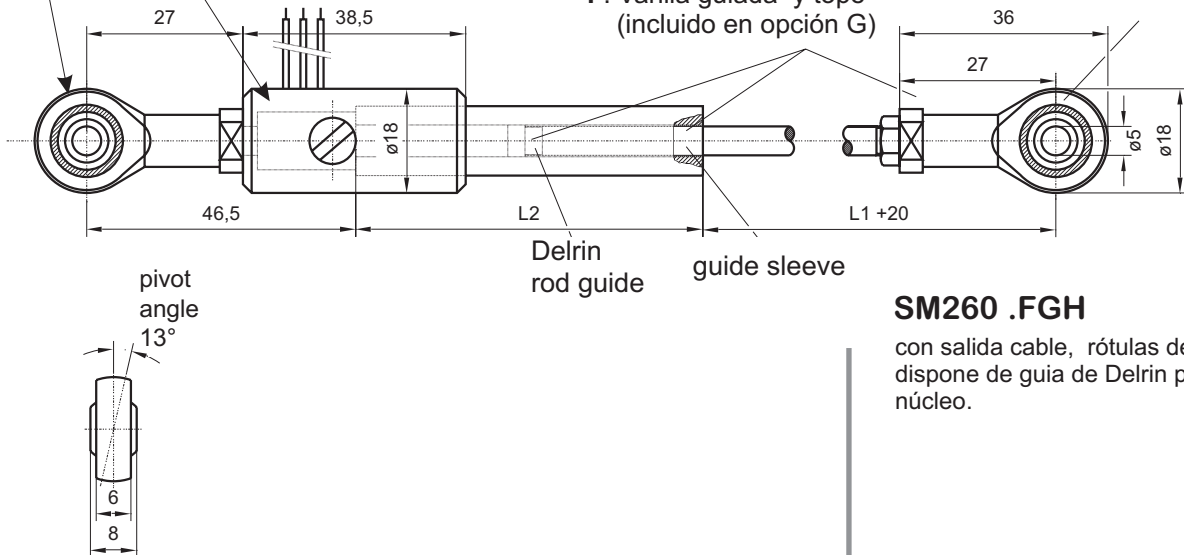


H: Rótula en carcasa

-: Salida cable con rótula

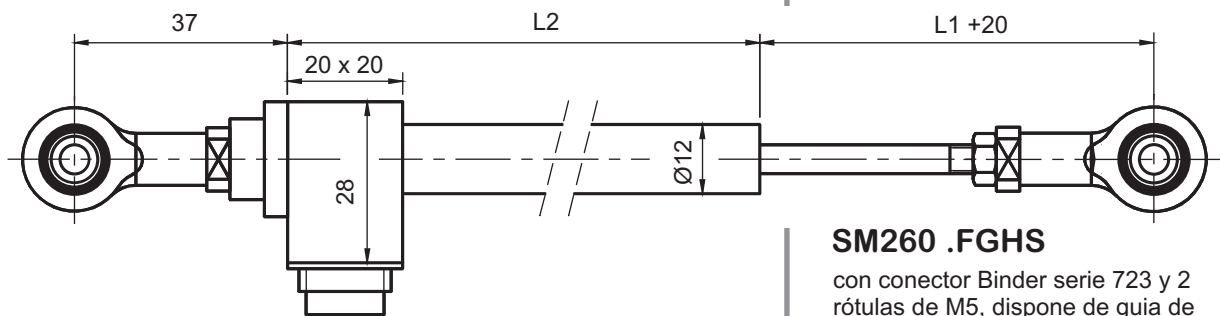
F: Varilla guiada y tope
(incluido en opción G)

G: Rótula en varilla



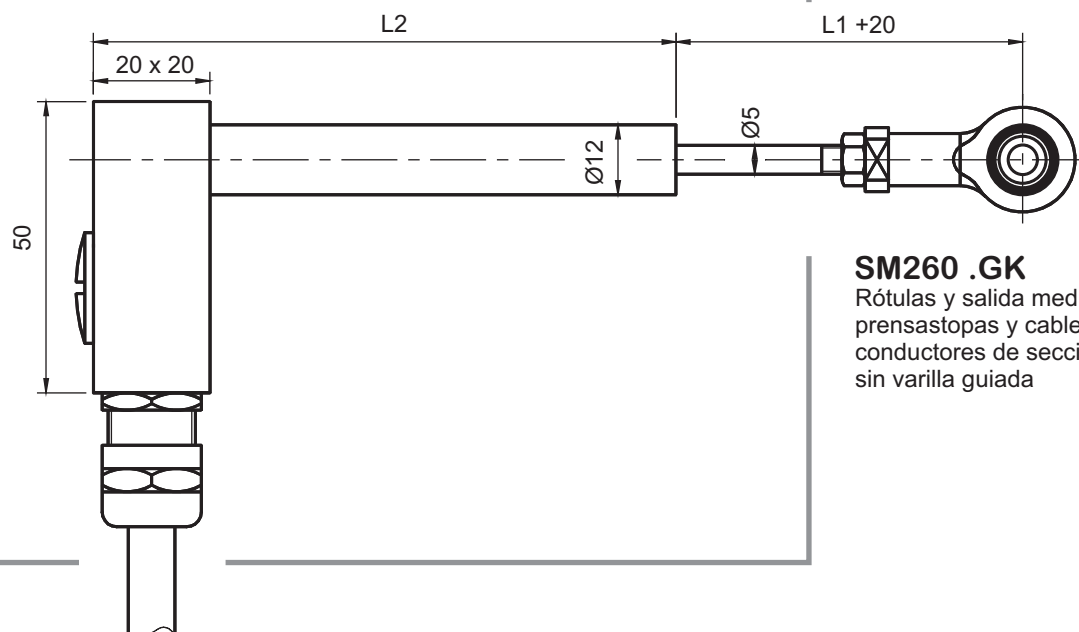
SM260 .FGH

con salida cable, rótulas de Ø5, dispone de guía de Delrin para el núcleo.



SM260 .FGHS

con conector Binder serie 723 y 2 rótulas de M5, dispone de guía de Delrin para el núcleo.



SM260 .GK

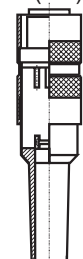
Rótulas y salida mediante prensastopas y cable de 3 conductores de sección 0,56 mm., sin varilla guiada

Conectores:

(mediante pedido aparte)

SM901.400(3/4) SM901.402(3/4)

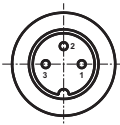
IP40
3 - 4 polos



IP65
3 - 4 polos
puede ser
recto o
acodado

Conexión eléctrica

1: WM
2: MS
3: WP



Material:

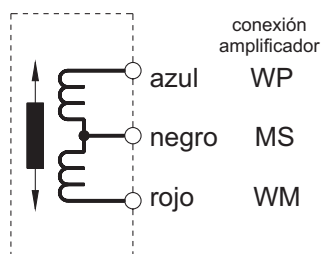
Tubo interior y exterior	acero inoxidable
Varilla	acero inoxidable
Núcleo	aleación Ni-Fe, inoxidable
Carcasa del conector	latón niquelado
Contactos conector	latón dorado
Muelle	acero inoxidable
Tope del muelle	aluminio anodizado en negro

Ganancia:

Recorrido	mV / mm ($\pm 10\%$)
24mm	175
40mm	110
60mm	100
100mm	55
150mm	45
200mm	30

Salida cables

3 cables AWG28

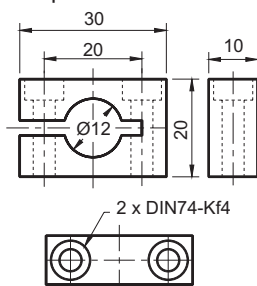


Construcciones especiales:

Construcción .F	varilla guiada con topes
Construcción .G	rótula en varilla
Construcción .H	rótula en carcasa
Construcción .K	salida cable prensaestopas
Construcción .T	con palpador (solo hasta 150 mm)
Construcción .S	con conector

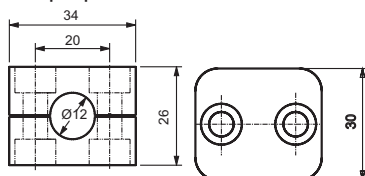
Abrazaderas de montaje SM906.260

Latón niquelado



SM906.261

Polipropileno



Incluidos 2 tornillos M6x30
DIN912VA

Amplificadores de señal para sensores LVDT (medio puente, 10 Khz)
Salidas: 0/4...20 mA (± 20 mA) 0...10 Vcc (± 10 Vcc)

SM10xN

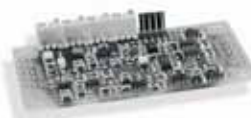
Amplificador carcasa
metal, montado para
carril DIN

SM12x

Amplificador en placa,
para 1 ó 2 canales.

SM12xN

Amplificador 1 ó 2
canales, montado para
carril DIN



* Ver especificaciones

Referencia para pedidos

SM2x0



(F) Con varilla guiada y tope
(G) Rótula en la varilla
(H) Rótula en la carcasa
(K) Salida cable con prensaestopas
(S) Salida con conector Binder
(T) Palpador (hasta 150 mm)
(1) Linealidad 0,25%
(2) Linealidad 0,5% (estándar)
Desplazamiento en mm
Serie

Amplificadores para LVDT (medio puente)

Señales de salida mA y Vcc

SCHREIBER
MESSTECHNIK
DIN ISO 9001

Serie

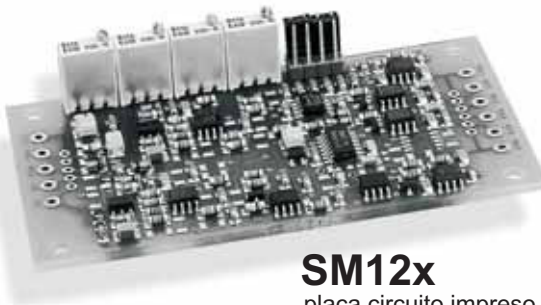
SM1x



SM12x.N
carril DIN



SM10x.N
carril DIN



SM12x
placa circuito impreso



SM10x
circuito impreso

Modelos estándar:

Tipo	Salida	Alimentación**	Centro*
SM1x1	0...20 mA	20...32 Vcc	10 mA
SM1x3	4...20 mA	20...32 Vcc	12 mA
SM1x5	± 10 Vcc	± 12...16 Vcc	0 V
SM127	0...10 Vcc	20...32 Vcc	5 V
SM108	± 20 mA	± 11,5...16 v	10 mA

* Regulable mediante potenciómetro del cero ± 10%

** Protegido contra polarización inversa

Datos técnicos:

Frecuencia del oscilador	10 KHz nominal
Voltaje del oscilador	13,6 V _{pp} Senoidal
Punto cero	regulable en ± 10 %
Amplificación	regulable, con jumpers y potenc.
Frecuencia límite	800 Hz
Variación con la temperatura	< 0,005% / °C
Temperatura de trabajo	-20 °C .. +85 °C

- Placa electrónica abierta con ASIC SM17
- Posibilidad de amplificar dos sensores
- También se puede suministrar en carcasa para carril DIN

Construcción y funcionamiento:

Los módulos de la serie SM1x contienen el Asic SM17 de diseño propio para la amplificación de uno o dos sensores de desplazamiento o de ángulo. Estos amplificadores suministran a los sensores una tensión alterna estabilizada y convierten la señal de medida en una tensión o corriente proporcional al desplazamiento. La amplificación se preajusta mediante Jumpers. El ajuste preciso se realiza mediante potenciómetros.

Los módulos se pueden suministrar en una carcasa normalizada para carril DIN.

En el modelo SM10x la electrónica está contenida en una carcasa de latón niquelado soldada herméticamente (SM10) y protegida contra la humedad, choques y vibraciones.

Salida corriente (SM 121 / SM 123) :

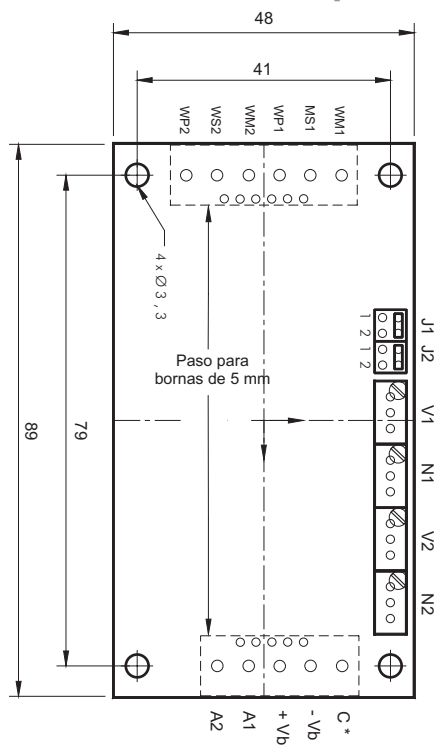
Corriente de salida Ib	1 canal : max. 70 mA 2 canales : max. 110 mA
Resistencia a la potencia aparente R1	0,500 ohm.
Ondulación residual	<0,005 mA pp
Dependencia de R1	<0,001 % con $\Delta R1 = 100$ ohm.
Dependencia de Vb	<0,05 % con $\Delta Vb = 1$ V.

Salida corriente (SM 125 / SM 127) :

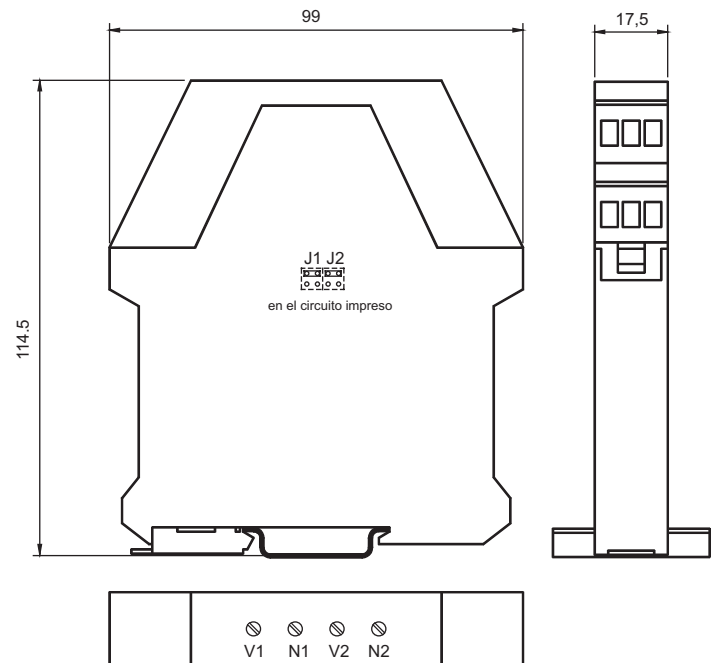
Corriente de salida Ib	1 canal : max. 50 mA 2 canales : max. 90 mA
Carga permitida R1	$\geq 2 \text{ Kohm}$ (protegido contra cortocircuitos)
Ondulación residual	$< 0,5 \text{ mV pp}$
Tensión residual SM127	máx. $0,2 \text{ Vcc}$
Dependencia de Vb	$< 0,05 \%$ con $\Delta Vb = 1 \text{ V.}$

Observaciones : de no indicarse otra cosa, los valores antes indicados serán válidos a una temperatura ambiente de 20°C y 24 Vcc, o bien ± 15 Vcc de tensión de servicio Vb tras 10 minutos de conexión.

Dimensiones modelo SM12x

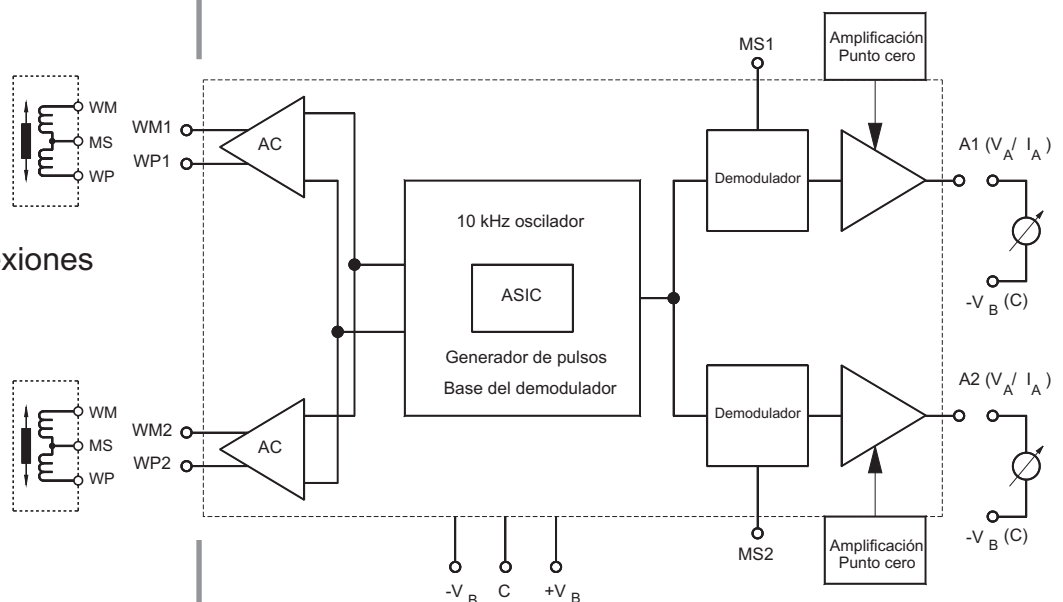


Carcasa Phoenix ME 17,5 para carril DIN normalizado.
Potenciómetros de ajuste en el frontal (para 1 ó 2 canales)



SM12x.N Caja carril DIN

Bloque de conexiones SM12x



* En el modelo SM125 aplicar tensión de servicio 0 V en C

Salida en corriente (SM101 / SM103):

Sensibilidad	regulable
Desplazamiento del punto cero	regulable $\pm 10 \%$
Corriente de servicio Ib	max. 60 mA
Resistencia a la potencia aparente	0... 500 ohm
Ondulación residual	< 0,005 mApp
Dependencia de RL	< 0,001 % con $\Delta RL = 100 \text{ ohm}$
Dependencia de Vcc	< 0,05 % con $\Delta V_{cc} = 1V$

Salida en tensión (SM 105):

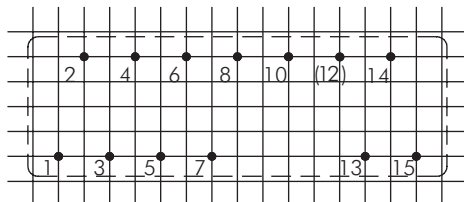
Amplificación	regulable
Desplazamiento del punto cero	hasta $\pm 10 V$ regulable
Corriente de servicio Ib	max. 50 mA
Carga permitida RL	$\geq 2 \text{ Kohm}$ (resistente al cortocircuito)
Ondulación residual	< 5 mV pp
Dependencia de Vcc	< 0,05 % con $\Delta V_{cc} = 1V$

Observaciones: de no indicarse otra cosa en contrario, los valores indicados son válidos a una temperatura de 20 °C y una alimentación de 24 Vcc o $\pm 15 V_{cc}$, tras 10 minutos de conexión

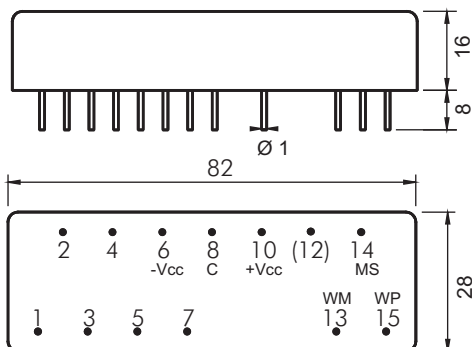
Dimensiones modelo SM10x

Raster 5mm

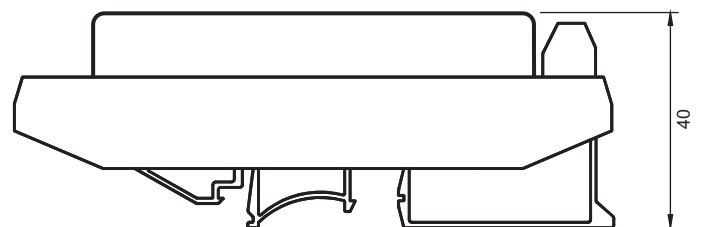
(Vista desde la cara de componentes)



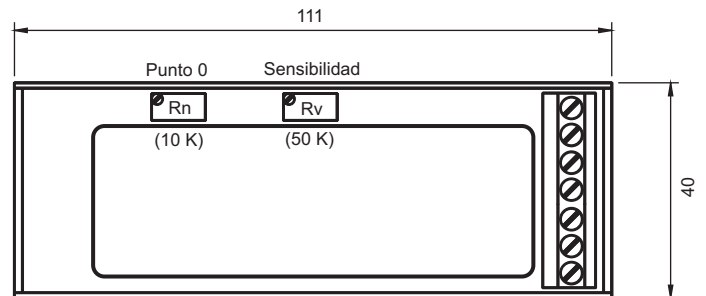
Dimensiones en mm



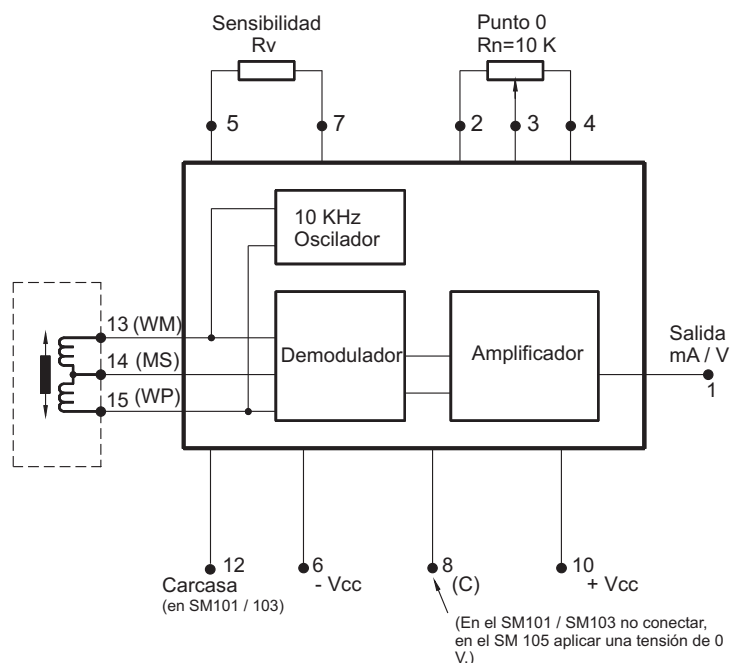
SM10x.N Caja carril DIN



(Vista desde la cara de componentes)



Bloque de conexiones SM10x



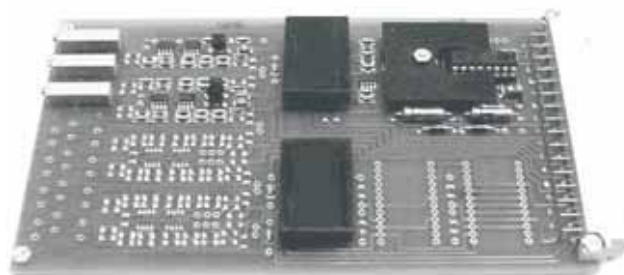
Ayudas para la instalación: Entre el pin 5 y el 8 se puede medir una tensión demodulada de 0 V, cuando la varilla está a mitad del recorrido.

Serie SM14x

Tarjeta Europa estándar para la amplificación de 3, 5 ó 7 canales, conector DIN 41612

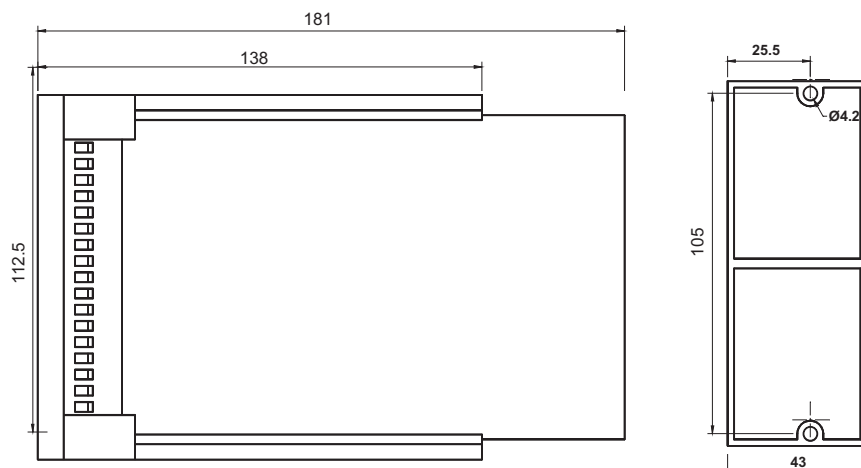
Módelos estándar:

Tipo	Salida	Alimentación	Medio
SM141	0 .. 20 mA	21,5 .. 32V	10 mA
SM143	4 .. 20 mA	21,5 .. 32V	12 mA
SM145	± 10 V	± 12 .. ± 16 V	0 V
SM147	0 .. 10 V	21,5 .. 32V	5 V



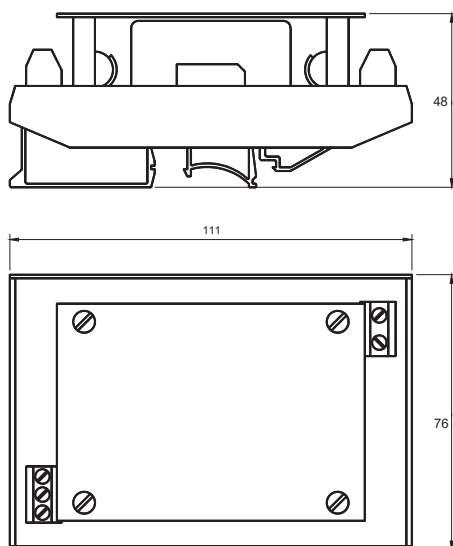
Tarjetas Europa con bastidor

Se pueden suministrar con dos o tres módulos y una fuente de alimentación, montados sobre tarjeta formato europa, con un máximo de 6 potenciómetros. Modelos SM110.x. El bastidor SM906.110 debe pedirse aparte.



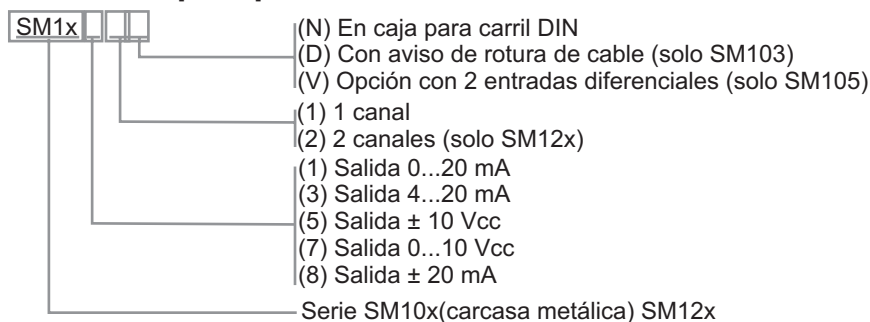
Serie SM109

Amplificador carril DIN (SM10x), con fuente de alimentación 220 Vac.



Alimentación	230V $\pm 10\%$ 50 oder 60 Hz
Consumo nominal	30 mA AC
Señal de salida U_A	± 15 VDC ± 0.5 V
Consumo I_A	max. 140 mA
Estabilidad U_A	$U_B = 210$ bis 250 V: ± 75 mV $I_A = 0$ bis 140 mA: ± 75 mV
Ondulación	bei $I_A = 140$ mA: ± 20 mV _{SS}
Efecto Temp.	± 1 mV / °C
Temp. trabajo	-20°C bis +85°C
Peso	~ 240g

Referencia para pedidos



TRANSMISORES DE PRESIÓN HIDRÁULICA

DPF
sensors

Estos transmisores contienen la mínima cantidad de componentes: el elemento sensor (piezorresistivo en membrana de acero), la electrónica (completamente ASIC) y el conexionado.

Fabricado completamente en acero inoxidable, construcción totalmente soldada, estos sensores están destinados a las aplicaciones industriales más diversas y son compatible con casi todo tipo de fluidos. No tiene aceites de silicona ni juntas internas.

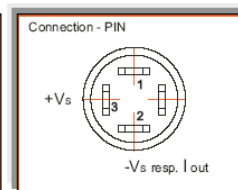
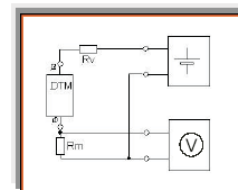
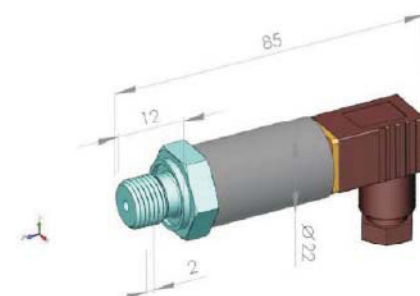
Disponible en stock, con salida 4...20 mA.

Bajo petición salida 0...10 Vcc / 0,5...4,5 Vcc / Bus CAN



E13-VF

E14-VF, SALIDA Vcc



Versión alta temperatura



Membrana enrasada

Campos de medida estándar	1,6-2,5-4-6-10-16-25-40-60-100--160-250-400-600-1000-1600-2000-4000 BAR
Sobrepresiones	hasta 2x (<100 bar , resto 1,5x
Presión de rotura	3 x
Tipos de medida	relativa o absoluta
Conexión a proceso	G 1/4 E (estándar), G 1/4Flat, 1/4"NPT
Partes en contacto con el fluido	< 500 BAR CrNi1810 INOX 304 >500 BAR CrNiCuNb 174 Inox 630
Peso total	90 gr
Señales de salida	4...20 mA (estándar) 0...10 Vcc, Bus Can
Tensión de alimentación	de 12 a 32 Vcc
Tiempo de respuesta (10...90%)	< 1 mseg.
Resistencia de aislamiento (50 Vcc)	100 Mohm
Conexión eléctrica	Estándar DIN 43650 BFC
Grado de protección	IP65
Error de linealidad a 20 °	± 0,5 % max F.E.(opcional 0,25%)
Estabilidad por año	< 0,1% F.E. / año
Temp. ambiente / fluido	-40...+105° / -40 ...+150°
Error Total de calibración	± < 0,7% F.E. (-20...+80°)
Comp. electromagnética.	DinEN55022 y DinEN6100-4-3-(25V/m)
IEC 68-2.6 y IEC 68-2-36	20g



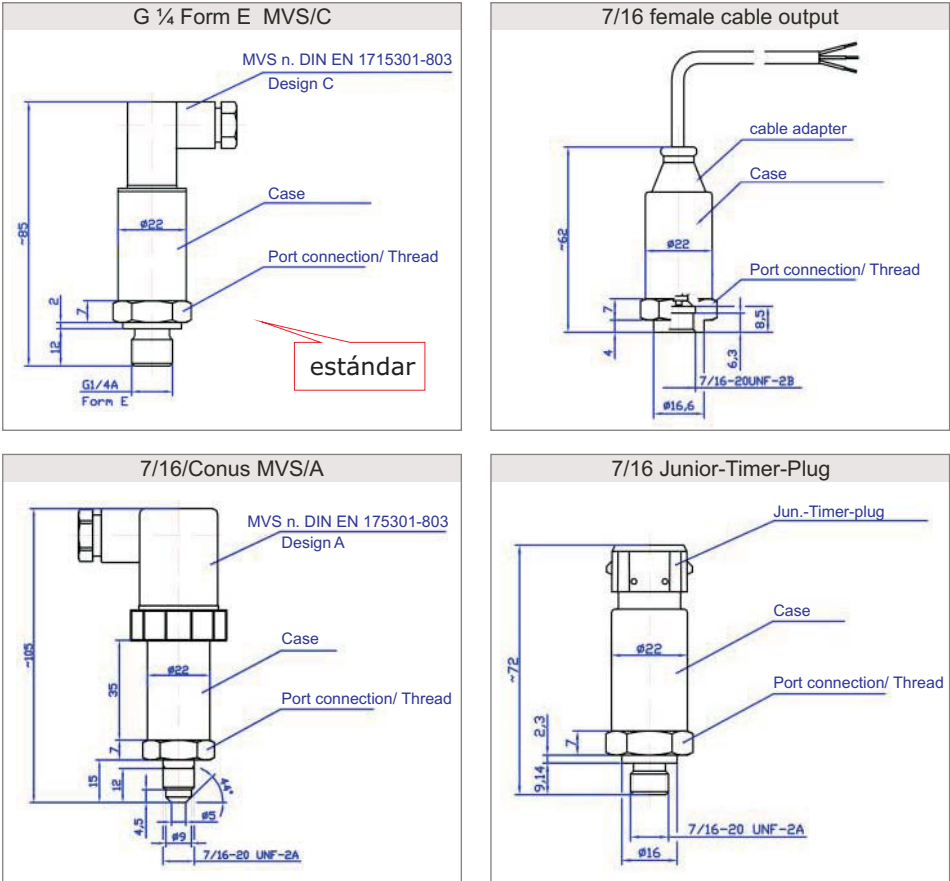
Debido al proceso de fabricación podemos ofrecer cualquier modificación al modelo estándar, diferentes tipos de rosca para proceso, modo de conexión y presiones.



GUEMISA

Sta. Virgilia 29, local 28033 Madrid Tfno.: 91 764 21 00
Fax.: 91 764 21 32 Email: ventas@guemisa.com

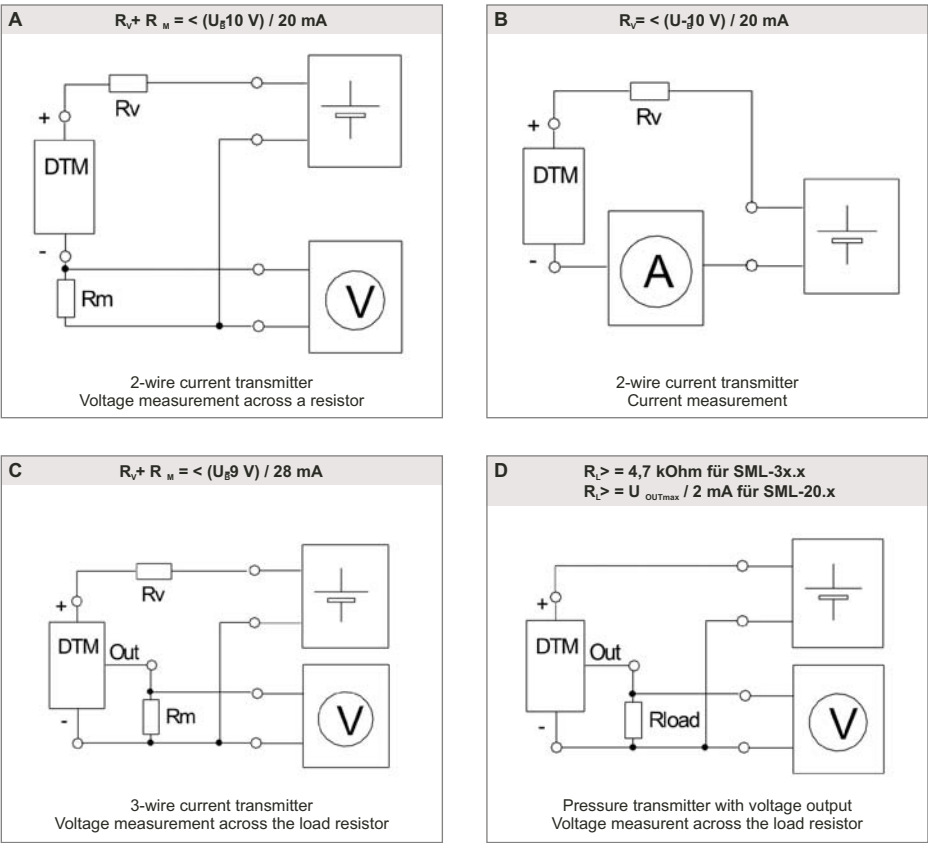
mechanical examples:



Electrical

- All wiring should conform to local codes and must be carried out by authorised personal only. Keep high and low voltage wiring separated. For applications in critical industrial environment use special cables.
- Observe without fail the connecting information labeled on the transmitter or laid down in the operating instructions while connecting the pressure transmitter.
- Ensure that the cables routed without crushing.

DTM pressure transmitter
 R_v serial resistor (advisable)
 R_m Resistor for measurement
 U_B Batterie voltage
 R_L load resistor



Células de carga modelo **DPF-BPSE** Load cells model **DPF-BPSE**

FICHA TÉCNICA

Tracción - Compresión



- Células fabricadas en acero aleado y niquelado, salida por cable 5 metros, sensibilidad 2mV/V, IP 65.
- Opción conector MIL.
- Posibilidad de fabricar otros rangos
- Accesorios para trabajo a tracción.
- Fabricación nacional.
- Referencia a ISO376
- Para aplicaciones dinámicas y estáticas.
- Alta estabilidad a largo plazo

Especificaciones Técnicas/Technical Characteristic

Sensibilidad / Sensibility.....	2(mV/V) ± 0,5%
Tensión de excitación Bridge excitation voltage.....	5..24V(max.35V)
Tolerancia de ajuste del cero Tolerance adjust on zero.....	<0,25% F.Escala

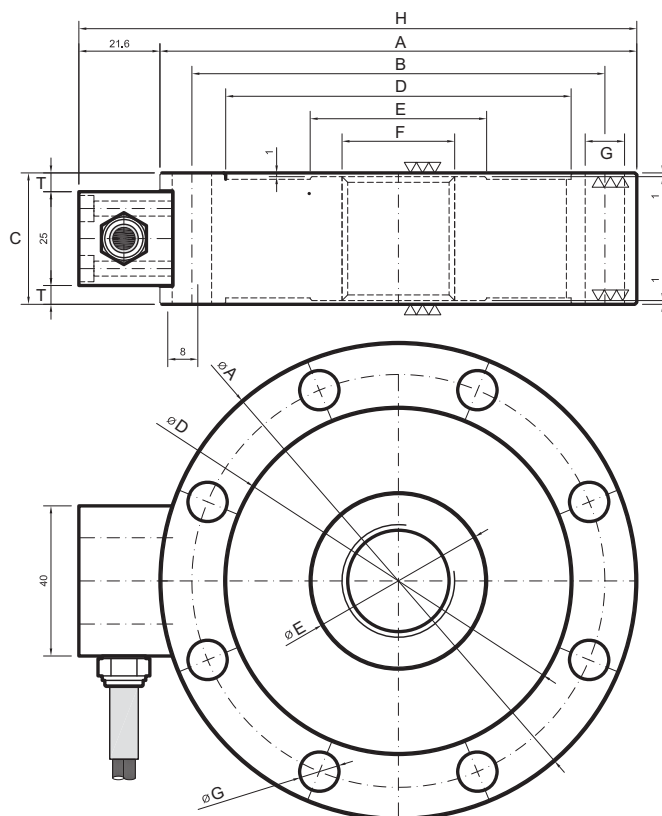
No linealidad / Non linearity.....	<0.015 % F.E.
No repetibilidad / Non repeatability.....	<0.015 % F.E.
Error combinado / Combined error.....	<0.03 % F.E.
Histéresis / Hysteresis.....	<0.02 % F.E.
Fluencia en 30 minutos / Creep in 30 min.....	<0.016 % F.E.
Fluencia en 4 horas / Creep in 4 hours.....	<0.05 % F.E.

Efecto de la temp. sobre la sensibilidad / Temp. effect on sensibility.....	<±0.0015 % / °C
Efecto de la temp. sobre la señal de cero / Temp. effect on zero.....	<±0.0023 % / °C
Margen de temp. compensado / Compensated margin of temp.	-10° y +40 °C

Resistencia de entrada / Input resistance.....	700 ±10
Resistencia de salida / Output resistance.....	700 ±1
Resistencia de aislamiento....(V.Test =100V) / Insulation resistance.....	>5.000 X 10 ⁶

Máxima carga de trabajo / Maximum work load.....	150 % F.E.
Límite de carga sin pérdida de características / Load limit without lost of characteristic.....	200 % F.E.
Carga de rotura / Break load.....	>300 % F.E.
Deformación máxima / Maximum deformation.....	<0,2 mm. F.E.

Cable / Cable.....	Flexible 4x0,34mm ²
Protección / Protection.....	IP 65



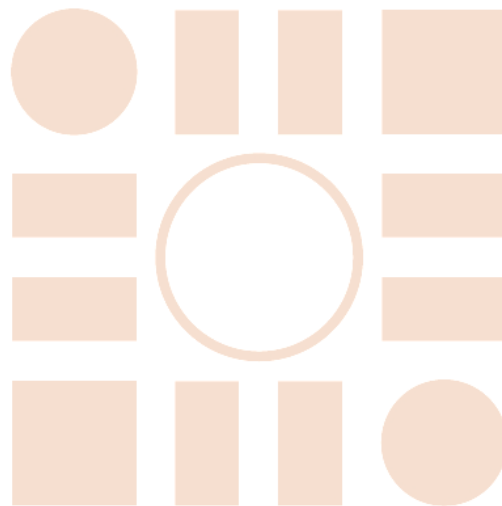
Conexión 4 hilos / 4 Threads connection

Excitación / Excitation +	Rojo / Red
Excitación / Excitation -	Negro / Black
Señal / Signal +	Verde / Green
Señal / Signal -	Blanco / White

Dimensiones en mm

Rango	ØA	B	C	ØD	ØE	F	G	n°G	H	T
0,5 ton	100	86	35	72	32	M20X1.5	9	6	121	5
1 ton										
2,5 ton										
5 ton	127	110	35	92	47	M30X2	10.5	8	149	5
10 ton										
20 ton										
30 ton	165	138	50	108	62	M42X3	17	12	188	12,5
50 ton										
75 ton										
100 ton	230	185	80	145	98	M60X3	26	12	254	25

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá